



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TAPIO LUKKARI

**SUUREN KESKINOPEUKSISEN MOOTTORIN MELUN VÄHENTÄMINEN
VIBROAKUSTISIN MENETELMIN**

Diplomityö

Tarkastajat: TKT Panu Maijala ja
dos. Juha Miettinen

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
8. kesäkuuta 2016

TIIVISTELMÄ

TAPIO LUKKARI: Suuren keskinopeuksisen moottorin melun vähentäminen vibroakustisin menetelmin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 67 sivua, 7 liitesivua

Helmikuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin koulutusohjelma

Pääaine: Akustiikka

Tarkastaja: TkT Panu Maijala ja dosentti Juha Miettinen

Avainsanat: vibroakustiikka, vähämeluinen ratkaisu, hiukkasnopeus, äänen säteily, reaktiivinen äänikenttä, komposiittimateriaali

Viimeisten vuosikymmenten aikana suuret dieselmoottorit ovat kehittyneet koko ajan tehokkaammiksi. Moottorien kasvavat sylinteripaineet ja keventyminen lisäävät niiden tuottamaa melua. Samaan aikaan melua koskevat säädökset kiristyvät, jolloin moottorimelun tutkiminen ja ääntä vähentävät ratkaisut ovat entistä tärkeämpiä.

Tämä tutkimustyö on vahvasti kokeellinen. Erilaisilla ääni- ja värähtelymittauksilla pyritään selvittämään suureen keskinopeuksiseen moottoriin liittyviä vibroakustisia ilmiöitä. Työssä otetaan käyttöön myös ensimmäinen kaupallinen sovellus akustisen hiukkasnopeuden mittaamiseksi. Sovelluksen käytettävyys ja mittaustulosten luotettavuus arvioidaan. Kattavat mittaukset ja niiden analysoinnit on suoritettu useille moottoreille.

Sylinterikannet ovat tällä hetkellä suurten keskinopeuksisten moottoreiden meluavin osa. Dominoivat melulähteet ilmenevät taajuuksilla 500 Hz – 800 Hz, joille tässä työssä löytyy useampia eri syitä: sylinterikansiin vaikuttavat herätteet ovat voimakkaat tällä taajuusalueella ja värähtelyä vahvistavat rakenteiden ominaistuuksudet. Rakenteen voimakas värähtely ei aina tarkoita sitä, että rakenne tuottaisi paljon ääntä. Kuitenkin nykyiset alumiiniset rakenteet havaitaan ääntä ongelmallisen hyvin säteileviksi ja ääni myös etenee hyvin ulospäin rakenteesta. Etenemisellä tarkoitetaan äänen siirtymistä rakenteesta pois päin. Sitä tutkitaan äänikentän reaktiivisuuden avulla.

Tässä työssä tutkitaan komposiittista valmistettujen sylinterikansien vaikutusta moottorimeluun. Toteutettu ratkaisu ja materiaalivalinnat perustuvat tässä työssä tehtyihin mittauksiin ja kirjallisuuteen. Komposiitti soveltuu käytettäväksi moottorin osana ja sen käyttö vähentää moottorimelua. Valittujen komposiittimateriaalien avulla saavutettiin 2 dB:n (1 m, A-painotettu äänenpainetaso) lasku. Erilaisilla materiaaliratkaisuilla voidaan optimoida sylinterikansien rakenne ja saavuttaa vieläkin hiljaisempi moottori.

ABSTRACT

TAPIO LUKKARI: Reducing the Noise Level of Large Medium speed Engine by Vibro-Acoustical tools

Tampere University of Technology

Master's thesis, 67 pages, 7 Appendix pages

February 2017

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Acoustics

Examiner: D.Sc. (Tech.) Panu Majjala and docent Juha Miettinen

Keywords: vibro-acoustic, low noise solution, particle velocity, sound radiation, reactive sound field, composite material

During last decades, engines have become more efficient leading to higher cylinder pressure and lighter structures. Without taking any action this leads to an increased engine noise level. Meanwhile, the regulations of the engine noise have become stricter. Due to this combination, noise investigation and low-noise solutions are needed.

This vibro-acoustical research is strongly based on experimental investigations of sound and vibrations of large medium speed engines. A new and unique sound measurement method for acoustic particle velocity is introduced and a number of other measurements were performed for sound and vibration. Measurement and analysis were made for multiple engines.

Cylinder head covers were found to be the major reason of engine noise. Engine total noise level is mostly affected by the frequencies between 500 Hz and 800 Hz. Several reasons exist why these frequencies dominate in all total noise level measurements. Vibrations of the covers are important due to the suitable excitations and natural frequencies of the cylinder head cover. High vibration level does not always lead to high level of noise. But in the case of these aluminium covers sound radiation and propagation is efficient at problematic frequencies. Propagation is studied by reactivity sound field concept.

Composite low-noise prototypes as cylinder head covers are tested in this thesis. The selection of the composite material was based on a literature review and the results of the measurements. The results show that the composite material is suitable for using as the part of the engine and the composite covers reduce the total noise of the engine. The effective low noise structure can be made by optimizing. The solution has potential because with the tested composite material and the dimensions, a 2 dB reduction in sound pressure level was reached.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Wärtsilä Finland Oy:n kanssa. Apua ja viisaita neuvoja olen saanut kaikissa käännteissä ohjaajaltani, meluasiantuntijainsinööri Zengxin Gaolta ja ääni- ja värähtelytiiminvetäjä Kari Saineelta. Koen, että olen saanut tehdä unelmatyötäni ja lisäksi olen saanut erityisen hyvin vastuuta ja vapauksia tämän projektin aikana. Työni tarkastajat TkT Panu Maijala ja dos. Juha Miettinen ovat aktiivisesti tukeneet työtäni vankalla kokemuksellaan ja puhtaalla tiedollaan. Säännölliset tapaamiset mahdollistivat työn jäsentämisen. Kiitokset teille kaikille! Olisi ilo toimia yhteistyössä teidän kaikkien kanssa vielä tämän projektin jälkeenkin.

Erityiskiitokset haluan antaa puolisololleni Eerikalle monimuotoisesta tuesta. Olet ymmärtänyt tämän työn takia aiheutuneet erikoisjärjestelyt. Kiitokset myös isä-Jussille, johon aina voin tukeutua kaikissa, eikä vähiten laadullisissa asioissa.

Vaasassa 28.2.2017

Tapio Lukkari

SISÄLLYS

1.	JOHDANTO.....	1
2.	TUTKIMUKSEN TAUSTAT.....	3
3.	VIBROAKUSTIIKKA	6
3.1	Akustiikka	6
3.2	Värähtely	15
4.	MOOTTORIMELUN MUODOSTUMINEN.....	18
4.1	Rakenteiden värähtely.....	18
4.2	Värähtelyn eteneminen	20
4.3	Äänen säteily	21
5.	TEHDYT MITTAUKSET	23
6.	MITTAUSJÄRJESTELYT.....	25
6.1	Scan & Paint.....	25
6.2	Äänen intensiteetti	27
6.3	Äänenpaine.....	28
6.4	Värähtely	29
7.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	32
7.1	Lähtötilanteen arviointi.....	32
7.2	Sylinterikansien suuren melutason syyt.....	33
7.3	Sylinterikansien tuottama melu eri tilanteissa.....	41
8.	VÄHÄMELUINEN RATKAISU.....	49
8.1	Suunnittelu	49
8.2	Testitulokset ja niiden tarkastelu	50
9.	TULOSTEN ARVIOINTI	60
10.	YHTEENVETO.....	64
	LÄHTEET	66

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CIMAC	Kansainvälinen polttomoottorialan järjestö (engl. The International Council on Combustion Engines)
FFT	Nopea Fourier'n muunnos (engl. Fast Fourier Transform)
FRF	Taajuusvastefunktio (engl. Frequency Response Function)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (engl. International Maritime Organization)
PLV	Hiukkasnopeustaso (engl. particle velocity level)
S&P	Scan & Paint -mittalaite, valmistaja Microflown Technology
SIL	Äänen intensiteettitaso (engl. sound intensity level)
SPL	Äänenpainetaso (engl. sound pressure level)
SWL	Äänitehotaso (engl. sound power level)
SOLAS	Kansainvälinen yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä (engl. Safety of Life at Sea)
<i>A</i>	Absorptioala (m ²)
<i>B</i>	Taivutusjäykkyys (Nm)
<i>c, c₀</i>	Äänen nopeus (väliaineessa) (m/s)
<i>dB</i>	Desibeli
<i>f</i>	Taajuus (Hz)
<i>f_c</i>	Kriittinen taajuus, koinsidenssitaajuus (Hz)
<i>f_{1, 2, 3, 4}</i>	Rakenteen ominaistaajuudet
<i>I</i>	Äänen intensiteetti (W/m ²)
<i>I₀</i>	Äänen intensiteetin vertailuarvo
<i>L_I</i>	Äänen intensiteettitaso
<i>L_p</i>	Äänenpainetaso
<i>L_u</i>	Hiukkasnopeustaso
<i>L_v</i>	Värähtelyn nopeustaso
<i>L_w</i>	Äänitehotaso
<i>m</i>	Massa (Kg)
<i>m''</i>	Pintamassa (kg/m ²)
<i>n</i>	Yksikkövektori
<i>p</i>	Äänenpaine (Pa)
<i>p₀</i>	Äänenpaineen vertailuarvo
<i>p_{rms}</i>	Äänenpaineen tehollisarvo (root mean square)
<i>T, t</i>	Aika (s)
<i>T₆₀</i>	Jälkikaiunta-aika (s)
<i>S</i>	Pinta-ala (m ²)
<i>u</i>	Hiukkasnopeus (m/s)
<i>u₀</i>	Hiukkasnopeuden vertailuarvo

v	Värähtelyn nopeus (m/s)
V	Tilavuus (m ³)
W	Teho, Ääniteho (W)
W_0	Äänitehon vertailuarvo
W_i	Akustinen ääniteho (pintaan saapuva)
W_t	Akustinen ääniteho (pinnan läpäissyt)
X_{max}	Taajuusvasteen huippuarvo
Π	Ääniteho (W)
α	Absorptiokerroin
ζ	Vaimennuskerroin
σ	Säteilysuhde
ρ	Tiheys (kg/m ³)
ω	Kulmataajuus (rad/s)
ω_n	Resonanssitaajuus

1. JOHDANTO

Moottoreita koskevat päästövaatimukset ovat kiristyneet jo useiden vuosikymmenien ajan. Tehokkuuden parantuessa moottorin sylinteripaineet kasvavat ja sen rakenteet tulevat kevyemmiksi. Nämä asiat johtavat moottorimelun voimistumiseen. Yhtälaillla melusäädökset kiristyvät, joten moottorin tuottaman melun tutkimiseen ja rajoittamiseen on keskityttävä enenevässä määrin. Laivamoottorin melua koskevat säädökset määrittelee IMO (International Maritime Organization), joka on hiljattain päivittänyt SOLAS-vaatimukset (Safety of Life at Sea): laivan konehuoneen yksittäisen pisteen äänenpainetaso (1 m moottorista) täytyy olla alle 110 dB.

Monimutkaisen rakenteen ansiosta suurella keskinopeuksisella diesel-moottorilla on valtava määrä erilaisia värähtelyn ja äänen lähteitä. Voimakkaimmat herätteet värähtelylle ja äänelle ovat peräisin moottorin pyörivistä osista ja sylinterissä tapahtuvasta palamisreaktiosta. Eri järjestelmien tuottama ääni jaetaan useasti runkoääneen ja ilmaääneen niiden kulkeman reitin perusteella. Jäykän rakenteen ansiosta heräte kulkeutuu moottorin rakenteessa vaivattomasti, joten moottorimelun tapauksessa runkoäänen merkitys on suuri.

Moottorimelu on aina yhdistelmä herätteestä, rakenteiden dynaamisista ominaisuuksista, äänen säteilystä ja sen etenemisestä. Voimakkaimmat herätteet vaikuttavat moottorin jokaiseen osaan joiden lisäksi paikalliset herätteet voivat vaikuttaa moottorin eri alueilla. Rakenteen käyttäytyminen määräytyy siihen kohdistuvien herätteiden ja myös sen dynaamisten ominaisuuksien mukaan, joita ovat esimerkiksi rakenteen massa, jäykkyys ja vaimennus. Jokaisella rakenteella on olemassa ominaistajuuksia ja –muotoja, joilla se värähtelee mieluiten. Värähtelyn muuntuminen havaittavaksi ääneksi on riippuvainen rakenteen kyvystä säteillä ääntä ja äänen etenemisestä rakenteen pinnalta pois päin. Asiat värähtelyn syystä aina tuotetun äänen etenemiseen asti täytyy ottaa selvälle, kun halutaan tietoa moottorin vibroakustisesta käyttäytymisestä.

Vibroakustiikassa tutkitaan, kuinka rakenteen värähtely muuntuu johonkin väliaineeseen ääneksi. [1] Vaikka jokin rakenne värähtelisi voimakkaasti, se ei välttämättä tuota voimakasta ääntä. Tämä on ominaista etenkin suurille ja massiivisille rakenteille, joista hyvä esimerkki on laivan moottori. Tällöin täytyy tietää mitä tapahtuu rakenteen ja ilman rajapinnassa. Tässä työssä tutustuttiin suuren keskinopeuksisen moottorin yläosan tuottamaan meluun käsitteiden äänen säteily [2] ja äänen eteneminen [3] avulla. Yläosa on tällä hetkellä moottorin meluavin alue [4], johon tässä työssä keskityttiin. Kirjallisuuden ja erilaisten mittausten avulla selvitettiin melun

muodostumisen syyt. Mittaukset muodostuivat sekä värähtely- että äänimittauksista. Moottorin melua mitattiin pääasiassa uudella Scan & Paint [5] mittalaitteella, jonka käytettävyys ja luotettavuus arvioitiin myös. Lisäksi työhön kuului ratkaisun suunnittelemisen ja toteutuksen moottorin yläosan melun vähentämiseksi. Ratkaisu pohjautui työn aikana tehtyihin mittauksiin sekä kirjallisuuden antamiin tietoihin erilaisten rakenteiden ja materiaalien vaikutuksesta ääneen. Työn tavoitteena oli selvittää, millä keinoilla moottorin yläosan äänenpainetaso laskisi alle 105 dB yhden metrin päässä moottorista.

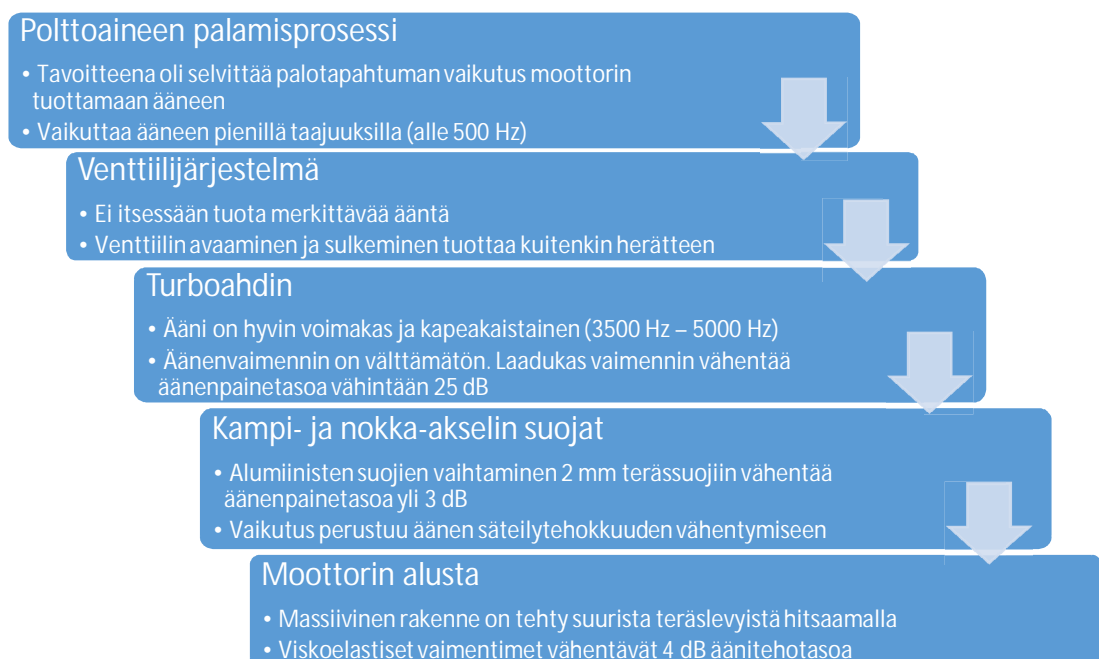
Tämä työ oli hyvin kokeellinen, koska tieto melulähteistä ja moottorimelun käyttäytymisestä saatiin erilaisten mittausten avulla. Aikaisempiin tutkimuksiin ja melua koskeviin säädöksiin tutustuttiin, jotta tiedettiin lähtötilanne ja rajoitukset suuren keskinopeuksisen moottorin tuottamalle melulle. Vibroakustiikan teorian ja se, miten ne käytännössä soveltuvat selittämään moottorimelun muodostumista, olivat myös tärkeitä tuntea. Tällöin tiedettiin minkälaisia mittauksia kannattaa tehdä ja osattiin tulkita saatuja mittaustuloksia. Ääni- ja värähtelymittauksia suoritettiin kymmenen eri moottorin lisäksi erilaisille testikappaleille. Mittaustulokset esitetään tässä työssä ja tulosten pohjalta toteutettiin vähämeluinen ratkaisu, joka esitetään tämän työn lopussa.

2. TUTKIMUKSEN TAUSTAT

Tämä työ tehtiin yhteistyössä Wärtsilä Finland Oy:n kanssa, joka on markkinajohtaja merenkulku- ja energiamarkkinoilla toimien yli 70 maassa ja työllistäen noin 18 000 henkilöä. Meri- ja energiateollisuuteen valmistettujen suurten moottoreiden teho on 3000 kW - 20 000 kW. Yksi tehokas moottori, kuten W20V46, voi kattaa keskisuuren suomalaisen kaupungin sähköntarpeen.

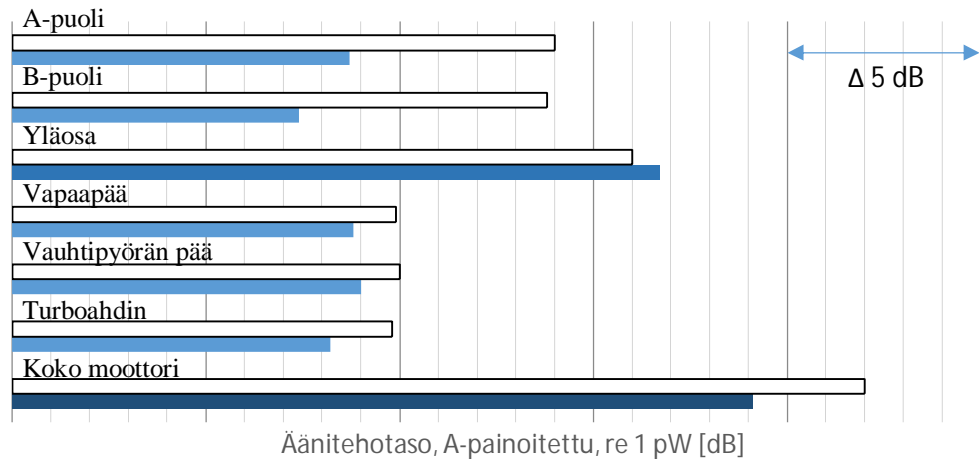
Melun tutkimisen kannalta suuri keskinopeuksinen moottori on monitahoinen haaste. Massiivinen ja monimutkainen järjestelmä sisältää valtavasti erilaisia melulähteitä. Moottorimelun tutkimisessa täytyy tutustua useaan eri tieteenalaan, kuten värähtelyyn, akustiikkaan, koneensuunnitteluun ja materiaalioppiin. Näiden avulla pystytään selvittämään syytä moottorin tuottamalle melulle.

Viimeisten kahden vuosikymmenen aikana Wärtsilä on saavuttanut hyvän ymmärryksen moottori- ja ympäristömeluista. Suuri määrä erilaisia tutkimuksia ja mittauksia on antanut kattavan näkemyksen moottorimelun käyttäytymisestä ja erilaisista melulähteistä. Yhtiö on useita kertoja onnistuneesti pienentänyt moottorimelua muuttamalla sen rakenteita tai vaihtamalla käytettyä materiaalia. Osa Wärtsilän moottorimeluun liittyvistä tutkimuksista ja vähämeluisista ratkaisuista on esitelty vuoden 2016 CIMAC- konferenssissa [4]. Kuvassa 1 on esitetty merkittävimmät moottorimeluun liittyvät projektit viimeisen vuosikymmenen ajalta.



Kuva 1. Wärtsilän aikaisemmat moottorimeluun liittyvät projektit viimeisen vuosikymmenen ajalta.

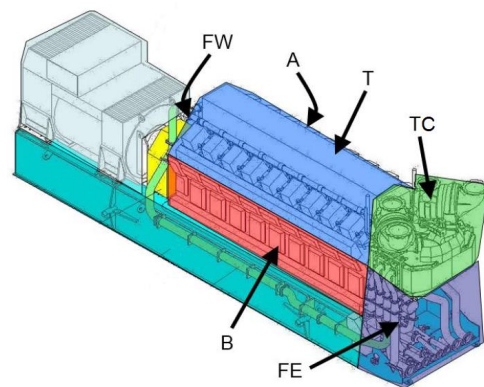
Vuosien aikana Wärtsilä on saanut vähennettyä moottorin tuottamaa melua. Moottorin äänitehotasot moottorialueittain on esitetty kuvassa 2, jossa näkyy meluratkaisujen vaikutus, sillä äänitehot on ilmoitettu ennen (valk.) ja jälkeen (sin.) merkittävien meluratkaisujen käyttöönottoa. Moottorialueet jaotellaan Wärtsilässä kuvan 3 osoittamalla tavalla.



Kuva 2. Meluratkaisujen vaikutus moottorialueiden äänitehotasoihin ennen (valk.) muutoksia ja niiden jälkeen (sin.).

Meluratkaisuilla on ollut suurin vaikutus äänitehotasoihin A- ja B-puolilla, joissa sijaitsevat kampi- ja nokka-akselin suojat. Kehityksen ansiosta myös moottorin vapaapään ja vauhtipyörän pään sekä turboahtimen äänitehotasot ovat laskeneet. Moottorin yläosan melutaso on sen sijaan säilynyt suurena ja erottuu selkeästi yli viiden desibelin erolla muihin nähden. Yläosan äänitehotaso on jopa noussut, koska moottori on entistä tehokkaampi ja melua vähentävää ratkaisua ei ole toteutettu.

- A A-puoli (käyttö)
- B B-puoli (huolto)
- T Yläosa
- FE Vapaapää
- FW Vauhtipyörän pää
- TC Turboahdin



Kuva 3. Wärtsilässä käytetyt moottorialueet.

Meluavimman moottorialueen vaikutus koko moottorin meluun korostuu. Esimerkiksi, jos kuvitellaan kolme melulähdettä, jotka yksittäin tuottavat äänenpainetasot 90 dB, 95 dB ja 100 dB yhden metrin päähän, niin yhdessä niiden tuottama äänenpainetaso on

101,5 dB. Tämä johtuu desibeli-asteikon logaritmisuudesta, joka on hyvä muistaa, kun tarkastellaan erilaisia mittaustuloksia. Tällä hetkellä suuren keskinopeuksisen moottorin meluavain alue on selkeästi sen yläosa. Tällöin yläosan melun rajoittamisella on välitön vaikutus koko moottorin melutasoon.

SOLAS-vaatimuksissa säädetty 110 dB rajoitus (taulukko 1) koskee kaikkia laivan koneiloja. Raja-arvolla tarkoitetaan A-painotettua äänenpainetasoa yhden metrin päässä moottorista, eikä asetettu arvo saa ylittyä missään yksittäisessä konehuoneen pisteessä. Tämä vaatimus on tullut voimaan pakollisena 2014 vuoden heinäkuussa.[6]

Taulukko 1. SOLAS-vaatimusten mukaiset melutasojen työskentelytilojen ylärajat [6]

Designation of rooms and spaces	Ship size	
	1,600 up to 10,000 GT	≥10,000 GT
4.2.1 Work spaces (see 5.1)		
Machinery spaces ⁵	110	110
Machinery control rooms	75	75
Workshops other than those forming part of machinery spaces	85	85
Non-specified work spaces ⁶ (other work areas)	85	85

Melutaso konehuoneessa muodostuu moottorin tuottamasta äänestä ja myös konehuoneen ominaisuuksista. Nämä molemmat tekijät täytyy ottaa huomioon, jos konehuoneen melutasoa halutaan tehokkaasti pienentää.

3. VIBROAKUSTIIKKA

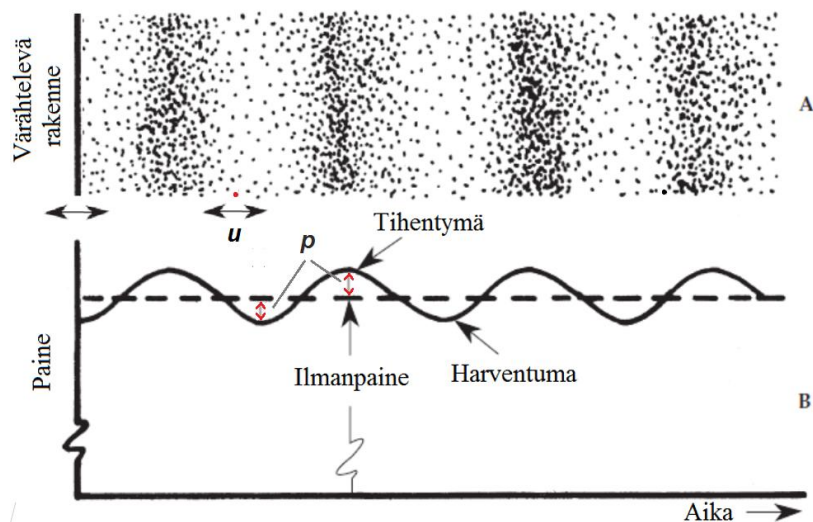
Tälläkin hetkellä lukija todennäköisesti altistuu usealle vibroakustiselle ilmiölle. Esimerkiksi auton kiihdytyksen ääni kantautuu ikkunalasien läpi tai askeleiden äänet kuuluvat yläkerrasta. Esimerkkejä löytyisi paljon, mutta yhteistä kaikille on vibroakustinen ilmiö: jonkin rakenteen värähtelyenergia muuntuu äänienergiaksi. Rakenteen tai järjestelmän vibroakustisen käyttäytymisen ymmärtämiseksi on hyvä käydä läpi perustiedot sekä akustiikasta että värähtelystä.

3.1 Akustiikka

Akustiikka tieteenalana tutkii äänen muodostumista, siirtymistä ja sen vastaanottoa. Erilaisia äänilähteitä on lukematon määrä, ja usein äänen vastaanottajana on ihminen. Siksi akustiikassa yhdistyvät monet eri tieteenalat, kuten dynamiikka, materiaalioppi ja jopa psykologia. Tässä työssä tutkittiin äänen muodostumista ja siirtymistä suuressa keskinopeuksisessa moottorissa ja sen ympäristössä.

Äänen muodostuminen ja akustiset perussuureet

Kuvitellaan jokin värähtelevä rakenne, joka on yhteydessä väliaineeseen (kuva 4, kohta A). Rakenne vaikuttaa väliaineen hiukkasiin saaden ne liikkumaan ja muodostaen ääniaallon. Hiukkaset ikään kuin puskevat toisiaan, joten ääniaalto etenee väliaineessa pitkittäisaaltona. Hiukkaset muodostavat hetkellisiä yli- ja alipainealueita, jotka voidaan ajatella hiukkasten tihentymiksi ja harventumiksi. Väliaine on siis välttämätön äänen muodostumiselle. Useimmissa tilanteissa, kuten tässä työssä, väliaine on ilma. [7]



Kuva 4. Ääniaalto etenee väliaineessa muodostaen hiukkasten tihentymiä ja harventumia (A), jotka hieman lisäävät tai vähentävät staattisen ilmanpaineen arvoa (B). (muok. lähteestä [7])

Äänenpaine p määritellään hetkellisen paineen ja staattisen paineen (ilmanpaine) erotuksena (kuva 4, kohta B). [8] Erotus on äänilähteen tuottama hetkellinen yli- tai alipaine. Ihmisen korva aistii pienenkin painevaihtelun, koska kuulokynnys ylittyy jo $20 \mu\text{Pa}$ äänenpaineella (vrt. staattinen ilmanpaine on noin 100 kPa). Kuulohavainto tapahtuu, kun painevaihtelu on taajuudeltaan välillä $20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$. Äänenpaineen tehollisarvo p_{rms} keskiarvoistaa äänenpainesignaalin $p(t)$ ja näin yhdistää mitatun äänenpaineen ja kuulohavainnon. Tämä voidaan esittää kaavoilla,

$$p_{rms} = \sqrt{\langle p^2(t) \rangle_T} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1)$$

missä $\langle \rangle_T$ on aikakeskiarvo ja T on integraalin jaksonaika. Äänenpaineen yksikkö on Pa ja tehollisarvon tuloksia voidaan käyttää mille tahansa jatkuvalle äänelle. [9][10]

Toinen tärkeä akustinen suure on hiukkasnopeus. Kuten kuvassa 4 kohta A esittää, hiukkaset työntävät toisiaan tuottaen pitkittäisaallon. Akustinen energia välittyy, mutta hiukkaset väliaineessa liikkuvat vain edestakaisin, jolloin niiden keskimääräinen siirtymä on nolla. Hiukkasnopeus u on vektorisuure, joten se sisältää tiedon suuruudesta ja suunnasta. Informaatio hiukkasten liikkeen suunnasta on hyödyllinen ja sitä käytetäänkin useissa akustiikan teorioissa ja sovelluksissa. Yksinkertaisessa äänen tasoallon tapauksessa (esimerkiksi värähtelevä mäntä putkessa) hiukkasnopeus voidaan määrittää kaavalla,

$$u = p/\rho c_0 \quad (2)$$

missä ρ on väliaineen tiheys ja c_0 on äänen nopeus. Hiukkasnopeuden yksikkö on m/s.

Äänen intensiteetti ilmoittaa, kuinka paljon äänienergiaa siirtyy tunnetun pinta-alan läpi aikayksikössä. Sen yksikkö on W/m^2 ja se voidaan määrittää äänenpaineen ja hiukkasnopeuden skalaaritulon avulla. Äänen intensiteetin aikakeskiarvo I aikavälillä T määritetään kaavalla:

$$I = \langle p\mathbf{u} \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T p\mathbf{u} dt \quad (3)$$

ja tätä arvoa käytetään yleisesti, kun puhutaan äänen intensiteetistä. Äänen intensiteetti on vektorisuure, koska se määritellään hiukkasnopeusvektorin avulla. Intensiteettiä käytetään monissa mittauskohteissa ja erityisesti sellaisissa, joissa halutaan paikallistaa äänilähde tai kun mitattu äänikenttä sisältää häiritseviä heijasteita. [3][11]

Ääniteho W kertoo äänilähteen kyvyn tuottaa akustista energiaa tiettyä pinta-alaa kohden [8]. Välittyvät energiamäärät ovat normaaleissa tilanteissa hyvin pieniä. Esimerkiksi pienen lentokoneen tuottama äänienergia on noin 5 W, joka riittäisi energian tuottamiseen vain pienelle hehkulampulle. Äänitehoa ei pystytä mittaamaan suoraan, mutta se pystytään määrittämään äänen intensiteetin ja pinta-alan avulla:

$$W = \int_S \mathbf{I} \cdot \mathbf{n} dS \quad (4)$$

missä \mathbf{I} on äänen intensiteetti, S on pinta-ala ja \mathbf{n} on pinta-alaa vastaava yksikkövektori. Usein äänilähde on pistemäinen ja äänienergia jakautuu pallopinnan alalle. Tällöin äänitehon voi laskea kaavalla:

$$W = 4\pi r^2 I \quad (5)$$

missä r on etäisyys ja I intensiteetin voimakkuus tällä etäisyydellä. [9] Äänitehoa käytetään äänilähteen tuottaman äänen voimakkuuden arvioimiseen. Toisin kuin mitattavat suureet se ei ota huomioon äänilähteen ympäristöä, joten sitä käytetään eri äänilähteiden vertailuun.

Akustiikassa käytetään usein logaritmisiä asteikkoja, koska akustiset suureet saavat arvoja laajalla vaihteluvälillä. Esimerkiksi äänenpaine kuulokynnyksellä on 20 μPa ja vastaavasti kipukynnys saavutetaan 112 Pa arvolla. Linearisella asteikolla lukuja olisi vaikea käyttää, koska lukujen suhde (1:560000) on valtava. Akustiikassa usein käytetyt logaritmiset suureet on esitetty taulukossa 2.

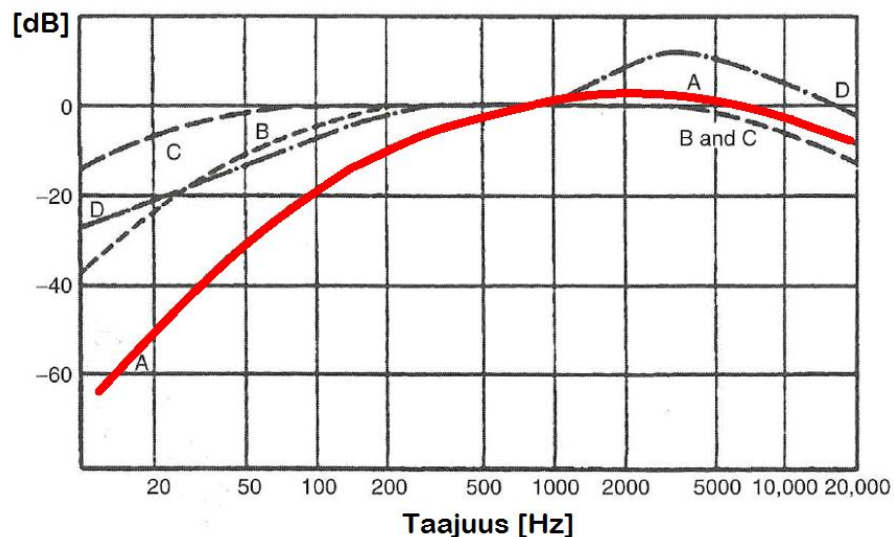
Taulukko 2. Logaritmiset suureet akustiikassa

Logaritminen suure	Kaava	Vertailuarvo (re)
Äänenpainetaso (sound pressure level, SPL)	$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$	$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$
Hiukkasnopeustaso (particle velocity level, PVL)	$L_u = 20 \log_{10} \frac{u}{u_0}$	$u_0 = 50 \text{ nm/s}$
Äänen intensiteettitaso (sound intensity level, SIL)	$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$	$I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$
Äänitehotaso (sound power level, SWL)	$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}$	$W_0 = 1 \text{ pW}$

Akustiikassa käytetty asteikko on 10-kantainen ja se kertoo aina suhteellisen suuruuden. Tällöin arvoa verrataan vertailuarvoon, joka on yleisesti sovittu. Logaritmiset suureet ilmoitetaan desibeleinä (dB).

Taajuuspainotukset

Akustiikassa on tärkeää, että mittaukset ja ihmisen kuulohavainto saadaan yhdistettyä toisiinsa. Mikrofonin herkkyys on signaalikäsittelyn jälkeen miltei sama kaikilla taajuuksilla. Korvan herkkyys vaihtelee taajuuden mukaan koko kuuloalueella 20 Hz – 20 kHz. Korva on herkin 4 kHz taajuudella kuuluville äänille ja herkkyys heikentyy voimakkaasti taajuuden pienentyessä. Erilaisilla mittaustulosten taajuuspainotuksilla pyritään muuttamaan tulos vastaamaan korvilla kuultua ääntä. Tyypillisimmät taajuuspainotukset on esitetty kuvassa 5.



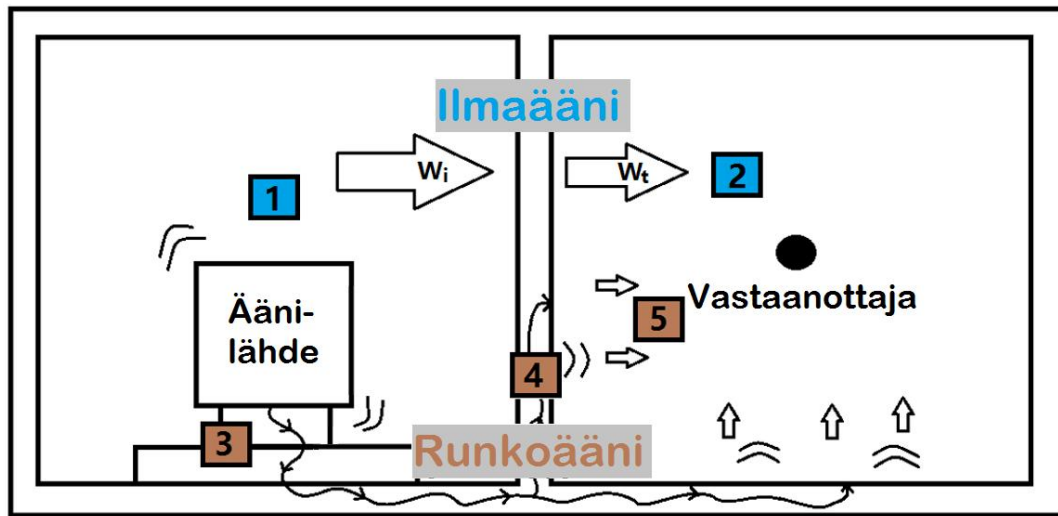
Kuva 5. Ihmisen kuuloa vastaavat taajuuspainotukset. (muok. lähteestä [9])

Eri painotukset A, B, C ja D on kehitetty vastaamaan kuulon herkkyyttä eri tilanteissa. A-painotus vastaa parhaiten korvan herkkyyttä normaaleille äänille ja äänitasoille. Sen käyttö on vakiintunut ja sitä käytetään useille tämän työn tuloksille. [9]

Ilma- ja runkoäännet

Havaittu ääni jaetaan kahteen eri ryhmään sen syntyvän ja kulkeman reitin mukaan. Puhutaan ilma- tai runkoäänistä, joiden eroavaisuuksia on havainnollistettu kuvassa 6. Esimerkissä on kaksi huonetta; toisessa niistä on äänilähde ja toisessa äänen vastaanottaja. Äänilähde tuottaa ilmaäänien (1), jonka akustinen energia vähentyy, kun se läpäisee väliseinän. Tällöin vastaanottaja altistuu heikentyneelle ilmaäänelle (2). Äänilähde on kiinnitetty lattiarakenteeseen ja saa sen värähtelemään (3). Värähtely kulkeutuu rakenteessa (joka voi olla mikä tahansa kiinteä väliaine) ympäristöön ja

kokee energiahäviöitä rakenteiden ja materiaalien vaimennusominaisuuksien mukaan (4). Lopulta värähtelyenergia muuntuu ääneksi (5), jolle vastaanottaja altistuu. [11]



Kuva 6. Ilma- ja runkoäänen eroavaisuudet.

Ilmaääneen vaikuttavat sekä huoneen heijastukset että materiaalien absorptio. Näistä asioista on lisätietoa kappaleessa huoneakustiikkaa. Myös erilaiset esteet vaikuttavat ilmaäänen etenemiseen. Kuten kuva 6 osoittaa, saapuvan ilmaäänen akustinen teho W_i laskee seinän toisella puolella arvoon W_t . Näiden arvojen avulla voidaan määrittää ääneneristävyys TL (transmission loss) jollekin esteelle.

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

missä tekijä τ on

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (7)$$

Ääneneristävyys kertoo esteen kyvyn eristää ilmaääntä. Sen suuruus on riippuvainen materiaaliominaisuuksista ja saapuvan ilmaäänen sisältämistä taajuuksista. Lähteestä [7] löytyy lisätietoa ääneneristävyydestä.

Runkoääni ymmärretään äänenä, jossa liikkuva kappale aiheuttaa jonkin rakenteen värähtelyn. Kun värähtelevä rakenne on yhteydessä ilmaan, se aiheuttaa ilmaäänen. Värähtelyn on tapahduttava taajuuksilla 20 Hz – 20 kHz, jotta siitä voi muodostua korvin kuultava ääni. [12]

Äänen säteily

Äänen säteilytehokkuuden avulla voidaan selvittää, miten jonkin rakenteen värähtely muuntuu ääneksi. Se määritellään vertaamalla tutkittavaa kappaletta ääntä ”täydellisesti” säteilevään kappaleeseen. Vertailuarvona käytetään jäykkää mäntää, jolla on sama pinta-ala kuin tutkittavalla kappaleella. Jonkin värähtelevän rakenteen säteilemä ääniteho on [2]

$$P = \sigma \rho c S \overline{v^2} \quad (8)$$

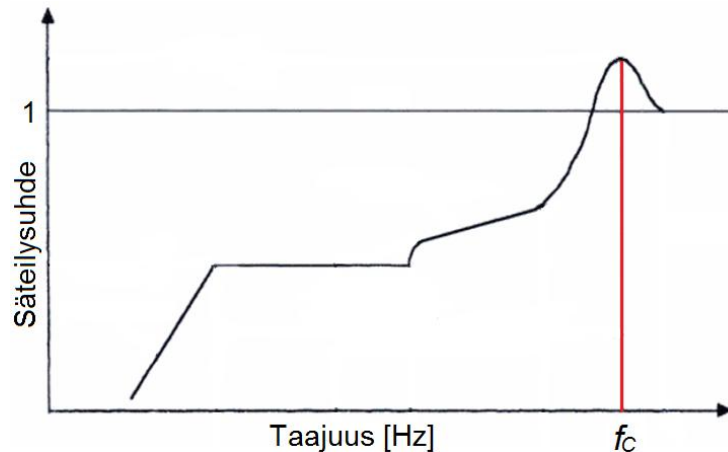
missä σ on säteilysuhde, ρ on rakennetta ympäröivän väliaineen tiheys (usein ilma), c on äänen nopeus väliaineessa, S on säteilevän pinnan pinta-ala ja v on pinnan värähtelyn nopeus. Merkintä $\overline{\quad}$ tarkoittaa aika- ja paikkakeskiarvoa. Laskennallisesti kriittiset arvot ovat useasti säteilysuhde ja värähtelyn nopeus. Pinnan värähtelyn nopeus on mahdollista selvittää mallintamalla tai mittaamalla, mutta säteilysuhteen määrittäminen on usein hankalampaa. Yksinkertaisen rakenteen säteilysuhde voidaan arvioida laskemalla. Esimerkiksi päättymättömällä vaimentamattomalla levyllä suhde on [2]

$$\sigma = \frac{1}{\left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{1/2}} \quad (9)$$

missä f on tarkasteltava taajuus ja f_c on levyn kriittinen taajuus (myös termiä koinsidenssitaajuus käytetään). Säteilysuhde voidaan esittää logaritmisella asteikolla, jolloin saatua suureta kutsutaan säteilyindeksiksi. Tällöin vertailuarvona on ”täydellisesti” ääntä säteilevän kappaleen säteilysuhde (re 1). Säteilyindeksi voidaan esittää kaavalla

$$L_\sigma = 10 \log_{10} \sigma \quad (10)$$

Kaikkien rakenteiden säteilysuhde muuttuu tarkasteltavan taajuuden mukaan ja kriittisellä taajuudella äänen säteily on tehokkainta. Kuvassa 7 on esitetty äärellisen levyn säteilysuhteen vaihtelu taajuuden mukaan, johon on myös merkitty levyn kriittinen taajuus.



Kuva 7. Levyn säteilyosuhteen muuttuminen taajuuden mukaan. (muok. lähteestä [2])

Säteilyosuhteen laskeminen monimutkaisille rakenteille on haastavaa. Kuitenkin kaikilla rakenteilla esiintyy kriittinen taajuus, johon pystytään vaikuttamaan. Kriittinen taajuus on riippuvainen rakenteen pintamassasta m'' ja käänteisesti riippuvainen sen taivutusjäykkyydestä B :

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B}} \quad (11)$$

Rakenteen säteilemää ääntä pystytään pienentämään suurettamalla kriittistä taajuutta. Kriittinen taajuus kasvaa, kun rakenteen massaa lisätään tai sen taivutusjäykkyyttä vähennetään. [12]

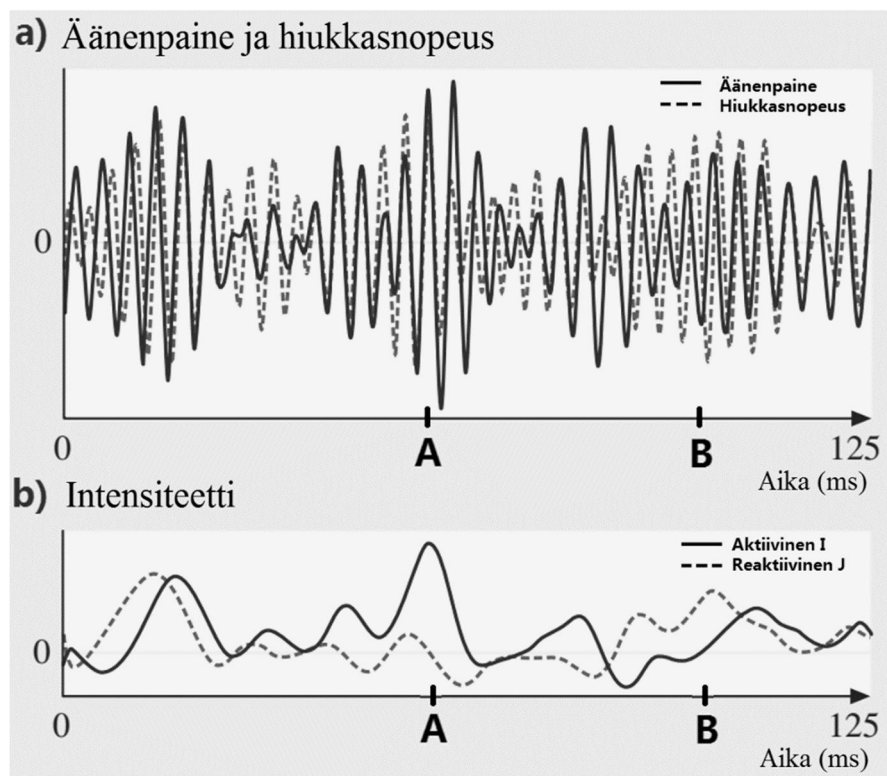
Äänen eteneminen

Äänikenttä jaetaan yleisesti kahteen eri osaan: lähi- ja kaukokenttään. Kaukokentässä äänen käyttäytyminen on johdonmukaista ja tällöin voidaan tehdä oletuksia äänen etenemisestä. Äänen kaukokentässä akustiikan perusteoriat ovat voimassa. Esimerkkinä nyrkkisääntö kaukokentän äänelle: kun etäisyys lähteestä puolittuu, äänenpainetaso nousee 6 dB.

Äänen lähikentässä ääniaaltojen käyttäytyminen on monimutkaista. Osa äänikentästä sisältää akustista energiaa, joka ei tuota ääntä. Tällöin kenttä on reaktiivinen eli värähtelevä rakenne vain liikuttaa ilmaa edestakaisin, mutta ei pysty paineistamaan sitä. Tällöin hiukkasten liike ei johda ääneen ja tällöin äänikenttä sisältää niin kutsuttuja häipyviä aaltoja (evanescent waves). Reaktiivinen äänikenttä on riippuvainen värähtelevän kappaleen mittasuhteista ja kyvystä säteillä ääntä. Reaktiivisuus vaihtelee myös tarkasteltavan taajuuden mukaan. Tyypillisesti reaktiivisen äänikentän vaikutus häviää noin puolen metrin etäisyydellä äänilähteestä. Vastaavasti aktiivisella äänikentällä tarkoitetaan sellaista lähikentän osaa, jonka akustinen energia tuottaa ääntä kaukokenttään. Aktiivisella äänikentällä on siis vaikutusta kokonaisäänien muodostumiseen. [13]

Äänikentän reaktiivisuus tai aktiivisuus voidaan määrittää äänen intensiteetin avulla. Äänen intensiteetti määräytyy hiukkasnopeusvektorin ja vallitsevan äänenpaineen avulla (kaava 3). Näiden kahden signaalin välinen vaihe määrää, onko toteutunut äänen intensiteetti enemmän reaktiivinen vai aktiivinen. Jos signaalit ovat samanvaiheiset eli niiden vaihe-ero on nolla (astetta), syntynyt intensiteetti koostuu vain aktiivisesta osasta. Toisaalta, jos signaalit ovat täysin vastakkaisvaiheiset eli niiden välillä on 90 asteen vaihe-ero, niin toteutunut intensiteetti on kokonaan reaktiivinen. Normaalisissa ympäristöissä hiukkasnopeuden ja äänenpaineen vaihe-ero on jotain tältä väliltä, jolloin äänikenttä sisältää sekä aktiivista (I) että reaktiivista (J) intensiteettiä. Niiden voimakkuutta ja suhdetta arvioimalla voidaan päätellä, miten jonkin äänilähteen säteilemä ääni kulkeutuu äänen kaukokenttään.

Esimerkiksi värähtelevän teräslaatikon tuottamaa melua on mitattu 30 cm päästä sen pinnasta. Kuvassa 8a näkyvät mitatut äänenpaineen (yhtenäinen viiva) ja hiukkasnopeuden (katkoviiva) aikasignaalit. Hetkellä A signaalit ovat lähes täysin samassa vaiheessa ja hetkellä B ne ovat eri vaiheessa. Näiden avulla on laskettu intensiteettien arvot (kuva 8b), jossa on toteutunut aktiivinen intensiteetti (yhtenäinen viiva) ja reaktiivinen intensiteetti (katkoviiva).



Kuva 8. Värähtelevän teräslaatikon tuottama äänenpaine ja hiukkasnopeus (a) ja äänen intensiteetit: aktiivinen intensiteetti I ja reaktiivinen intensiteetti J. (muok. lähteestä [14])

Kun äänenpaine ja hiukkasnopeussignaalit ovat samassa vaiheessa (hetkellä A) aktiivinen intensiteetti saa suuria arvoja. Tällöin värähtelevän laatikon tuottama ääni kulkeutuu tehokkaasti pois päin. Hetkellä B laatikon värähtely tuottaa myös akustista energiaa, mutta koska signaalit ovat vastakkaisvaiheessa, toteutunut intensiteetti on vain reaktiivista. Tällöin ääni ei kulkeudu kaukokenttään.

Huoneakustiikkaa

Useasti äänilähde sijaitsee ympäristössä missä sen lähettämä ääni kohtaa esteitä, kuten seiniä, lattioita ja erilaisia rakenteita. Näillä on vaikutusta syntyvään kokonaisäänitasoon ja myös äänikentän muodostumiseen. Tästä syystä mittauksia ei voida tehdä vapaakenttäoletuksilla, vaan ympäristön vaikutus täytyy ottaa huomioon. Kuten aikaisemmin todettiin, huoneakustiikalla voidaan vaikuttaa syntyvään äänitasoon ja se täytyykin ottaa huomioon esimerkiksi moottorihuoneiden suunnittelussa.

Kun ääniaalto törmää johonkin esteeseen, vain osa äänestä heijastuu takaisin. Toinen osa äänienergiasta muuttuu lämmöksi tai saa rakenteen värähtelemään. Absorptio kuvaa materiaalin kykyä muuntaa äänienergiaa toiseen muotoon. [9] Materiaalin absorptiokerroin saa arvoja nolasta yhteen ja suurempi arvo tarkoittaa parempaa kykyä muuntaa äänienergiaa. Absorptioala ottaa huomioon materiaalin pinta-alan ja sen absorptiokyvyn. Se vaikuttaa huoneen akustiseen käyttäytymiseen ja lasketaan kaavalla:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad (12)$$

missä S_i on materiaalin pinta-ala ja α_i on absorptiokerroin. Absorptioala ei yksinään riitä kertomaan jonkin huoneen akustisista ominaisuuksista, vaan lisäksi on tiedettävä huoneen tilavuus V . Näiden avulla voidaan laskea huoneen kaiunta-aika T_{60} . Se on aika, jona huoneen melutaso laskee 60 dB (intensiteettitaso), kun huoneen äänilähde on suljettu. Kaavaa kutsutaan Sabine kaavaksi ja se on

$$T_{60} = \frac{0,161 V}{A} \quad (13)$$

Huoneen melutason pienentäminen vaatii, että kaiunta-aika lyhenee. Tyypillinen kaiunta-aika auditorioissa ja studioissa on noin 0,7 s. Laivan konehuoneessa vastaava aika voi olla jopa 2-3 s, joka on samaa suuruusluokkaa kuin kirkoissa. Tällöin moottorin tuottama melutaso on huomattavan paljon suurempi, mitä se olisi, jos kaiunta-aikaa saataisiin rajoitettua esimerkiksi puoleen nykyisestä. Moottorihuoneen tilavuus on useimmiten vakio, joten muutokset täytyisi tehdä absorptioalaa lisäämällä. [7]

3.2 Värähtely

Värähtely määritellään rakenteen tai sen osan edestakaisena liikkeenä sen keskipisteen ympärillä. Tällöin sen potentiaalinen ja kineettinen energia vaihtelee [15]. Rakenne tarvitsee aina herätteen värähdelläkseen. Rakenteet, joihin vaikuttaa heräte ja joilla on jokin massa ja elastisuus, voivat värähdellä eli värähtelyä esiintyy kaikkialla normaalissa ympäristössä. Monen kappaleen käyttäytymisen pystyy mallintamaan yksinkertaisella massa-jousi-systeemillä. Tällainen yhden vapausasteen vapaan värähtelyn liikeyhtälö voidaan kirjoittaa käyttämällä Newtonin toista lakia

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (14)$$

missä m on massa, k on jousen jäykkyys ja x on siirtymä (\ddot{x} kiihtyvyyttä). Liikeyhtälö tulee monimutkaisemmaksi, kun mallinnetaan monimutkaisempaa rakennetta tai järjestelmää. Vaimennus C on tärkeä tekijä, kun mietitään jonkin järjestelmän käyttäytymistä. Lisäksi ulkoisen voiman (heräte) vaikutus on otettava huomioon. Lisätietoja erilaisten rakenteiden värähtelyominaisuuksista on saatavilla lähteistä [16] ja [17]. Lopputuloksena saadaan usein käytetty liikeyhtälö

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (15)$$

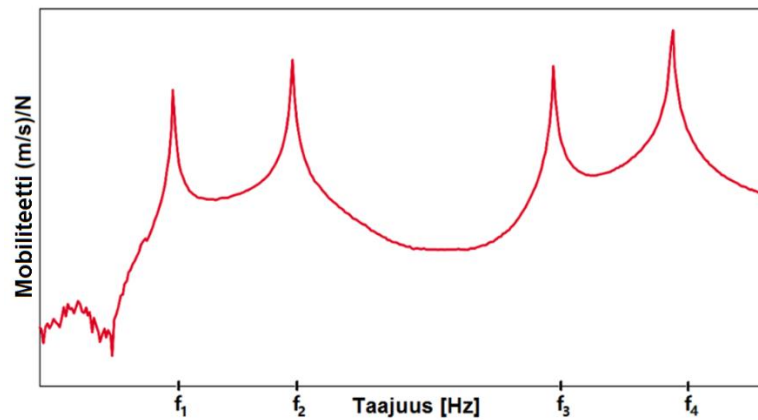
joka muuttuu ajan t suhteen ja ottaa huomioon matriisimuodossa järjestelmän massan \mathbf{M} , vaimennuksen \mathbf{C} , jäykkyyden \mathbf{K} ja järjestelmään vaikuttavan ulkoisen voiman \mathbf{F} . Näiden yhteisvaikutuksena syntyy järjestelmän vaste $\mathbf{x}(t)$. [16]

Moodianalyysi

Rakenteen ominaistajuudet määräytyvät sen muodon, massan, jäykkyyden ja vaimennuksen mukaan. Ominaisajuudella ja sitä vastaavalla ominaisuudella rakenne värähtelee helpoiten. Näiden asioiden kokeellista selvittämistä kutsutaan yleisesti moodianalyysiksi.

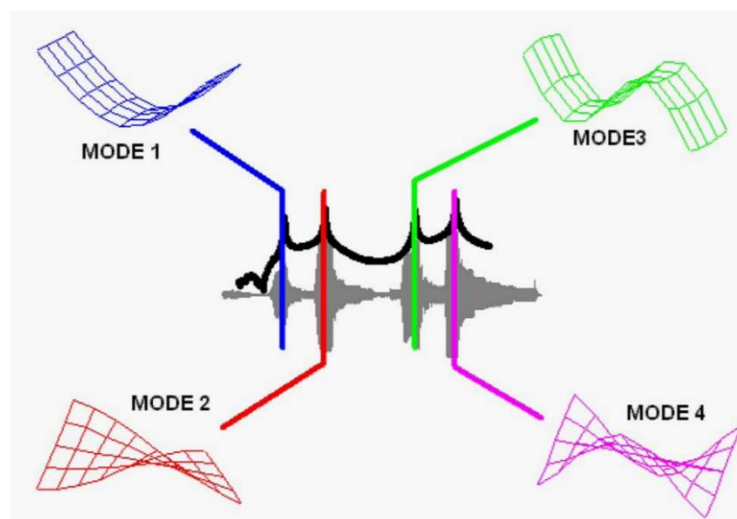
Moodianalyysissä tutkittavalle rakenteelle annetaan mitattu heräte, ja samalla mitataan herätteen tuottama vaste. Tarkastelemalla herätteen ja vasteen suhdetta saadaan selville rakenteen ominaistajuudet, -muodot ja vaimennus. Herätteen ja vasteen suhteesta saadaan taajuusvastefunktio (Frequency Response Function, FRF), joka saadaan taajuusmuotoon FFT-muunnoksen (Fast Fourier Transform) avulla. Lisätietoja FFT-muunnoksesta löytyy lähteestä [18]. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaisen levyn taajuusvastefunktio, kun sille on annettu impulssimainen heräte ja mitattu vaste yhdestä pisteestä. Levyn ominaistajuudet f_1 , f_2 , f_3 ja f_4 näkyvät kuvassa y-akselin suurina arvoina. Arvot voivat olla yksiköltään siirtymän, nopeuden tai kiihtyvyyden arvoja,

riippuen mitatusta vasteesta. Jos mitattu vaste on nopeus, taajuusvastefunktiota kutsutaan nimellä mobiliteetti (mobility) eli ”liikkuvuus” ja sen yksikkö on tällöin (m/s)/N. [19]



Kuva 9. Yksinkertaisen levyn taajuusvastefunktio. (muok. lähteestä [19])

Kun taajuusvastefunktio tiedetään useasta eri rakenteen pisteestä, voidaan sen ominaismuodot selvittää. Saman yksinkertaisen levyn taajuusvasteet on mitattu useasta pisteestä ja tulokset on esitetty kuvassa 10. Musta viiva on kuvan 9 taajuusvastefunktio, mutta nyt ominaistajuuksia vastaavat ominaismuodot on lisätty kuvaan. Rakenteen ominaistajuuksia vastaa tiettyä ominaismuotoa, sillä rakenne ei pysty värähtelemään samalla ominaistajuudella kahdella eri muodolla. Esimerkkilevyn ensimmäinen ominaismuoto (MODE 1) on pituussuuntainen taivutus ja seuraava (MODE 2) on pituussuuntainen vääntö.

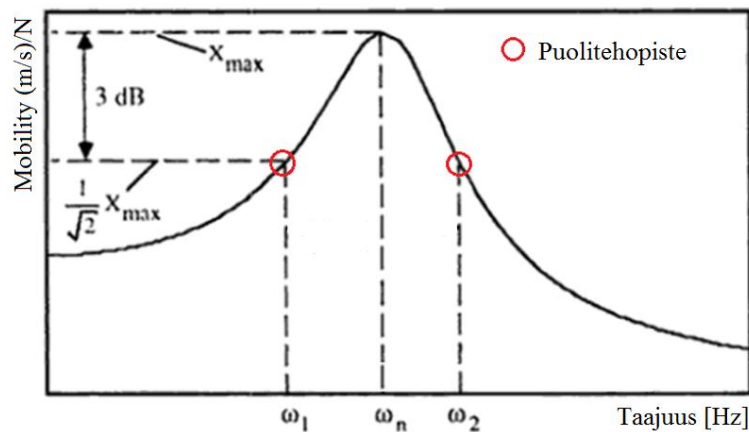


Kuva 10. Yksinkertaisen levyn ominaistajuuksia vastaavat ominaismuodot. [19]

Ominaismuodot eivät mene aina tässä järjestyksessä, vaan niiden esiintyminen on riippuvainen rakenteen materiaaliominaisuuksista ja muodosta. Esimerkiksi, jos levyäistä kappaletta tuettaisiin pitkittäissuuntaisilla rivoilla, pitkittäistaivutuksen

ominaismuotoa vastaava ominaistajuus kasvaisi. Tällöin se ei välttämättä olisi pienin ominaistajuus. [19]

Rakenteen vaimennusominaisuudet on mahdollista selvittää taajuusvastefunktion avulla. Vaimennus lasketaan tietylle ominaistajuudelle käyttämällä hyväksi taajuusvastefunktion muodostuneiden huippuarvojen tietoja. Perusajatus on: mitä terävämpi piikki, sitä vähemmän rakenteessa on vaimennusta. Kuvassa 11 on esitetty yksi taajuusvastefunktion piikki, kun mitattu vaste on ollut nopeus (mobility). Tällöin funktio saa suurimman arvonsa X_{max} resonanssitaajuudella ω_n . Puolitehopisteiksi kutsutaan taajuusvastefunktion arvoja, joissa huippuarvon teho on puolittunut eli huippuarvo on laskenut 3 dB. Pisteet on merkitty kuvaan taajuuden arvoilla ω_1 ja ω_2 ja ne lasketaan kaavalla $\frac{1}{\sqrt{2}} X_{max}$. [2]



Kuva 11. Taajuusvastefunktion huippuarvo ja vaimennuksen laskemiseksi tarvittavat tiedot. (muok. lähteestä [2])

Taajuuksien ω_1 ja ω_2 ero määrittelee rakenteen vaimennuksen tällä resonanssi- eli ominaistajuudella. Jos ero on pieni, muodostunut piikki on terävä ja toteutunut vaimennus on pieni. Vastaavasti taajuuksien eron ollessa suuri, rakenteen vaimennus on suuri. Vaimennuskerroin voidaan laskea kaavalla

$$2\zeta = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2\omega_n^2} \times 100 \% \quad (16)$$

Vaimennuskerroin on riippuvainen myös tutkittavan ominaistajuuden ω_n arvosta, joten esimerkiksi tässä työssä esitetty materiaalitestaus samankokoisille testilevyille antaa vaimennustuloksia eri taajuuksille. Vertailemalla samojen ominaismuotojen vaimennusta saadaan tietoa kunkin materiaalin kyvystä vaimentaa värähtelyä. [2]

4. MOOTTORIMELUN MUODOSTUMINEN

Moottorin tuottama melu on yhdistelmä moottorin rakenteiden värähtelystä, värähtelyn etenemisestä moottorin rakenteissa ja kyvystä muuntaa värähtely ääneksi eli äänen säteilystä. Tässä kappaleessa näitä ominaisuuksia on käyty läpi kappaleessa 3 esitettyjen vibroakustiikan teorioiden pohjalta.

4.1 Rakenteiden värähtely

Rakenne tarvitsee värähdelläkseen ulkoisen voiman eli herätteen. Se, miten rakenne käyttäytyy tietyn herätteen vaikutuksesta, riippuu sen ominaistaajuuksista, -muodoista ja vaimennuksesta. Rakenteen käyttäytymistä kutsutaan vasteeksi ja tätä mitataan värähtelymittauksissa. Analysoimalla vastetta voidaan erottaa herätteen ja rakenteen dynaamisten ominaisuuksien vaikutus.

Heräte

Suurella keskinopeuksisella moottorilla on suuri määrä erilaisia herätelähteitä. Mekaaniset moottoriherätteet tulevat massa- ja kaasuvoimista. Massavoimat ovat peräisin massiivisten kappaleiden pyörivistä ja edestakaisista liikkeistä, joita tuottavat kampiakseli, kiertokanget ja männät. Kaasuvoimat ovat peräisin polttoaineen palamisprosessista sylintereissä ja niiden voima vaihtelee eri moottoreiden välillä käytetyn polttoaineen, iskutilavuuden tai sylinterilukumäärän mukaan.

Moottorirakenteen värähtelyn yhteydessä puhutaan useasti kertaluvusta. Sen avulla voidaan selvittää, millä taajuuksilla massa- ja kaasuvoimat aiheuttavat herätteen. Se on ikään kuin moottoriherätteiden yksikkö, koska se määräytyy moottorin pyörimisnopeuden mukaan. Esimerkiksi W32 moottorin pyörimisnopeus on 750 rpm, joten moottorin ensimmäinen kertaluku on 12,5 Hz (750/60s). Tämän lisäksi moottoriherätteet toistuvat taajuustasossa aina puolen tai kokonaisen kertaluvun välein (taulukko 3). Ensimmäinen ja toinen kertaluku ovat massavoimien aiheuttamia ja loput johtuvat kaasuvoimista.

Taulukko 3. Moottoriherätteiden kertaluvut

Kertaluku	Syy	Esimerkki: 750 rpm moottori
0,5	Kaasuvoima	6,25 Hz
1,0	Massavoima	12,50 Hz
2,0	Massavoima	25,00 Hz
1,5, 2,5, 3,0, ...	Kaasuvoima	18,75 Hz, 31,25 Hz, 37,50 Hz ...

Yleensä herätteen voima heikentyy siirryttäessä suuremmille taajuuksille. Poikkeuksen tekee esimerkiksi sylintereiden sytytystapahtuma, joka tuottaa vahvan herätteen sytytystaajuudella. Sytytystaajuus vaikuttaa kertaluvulla, joka on puolet (rivissä olevien) sylintereiden lukumäärästä. Esimerkiksi 9-sylinterisen (tai 18-sylinterisen V-moottorin) nelitahtimoottorin sytytystaajuuden kertaluku on 4,5.

Moottoriherätteiden eli massa- ja kaasuvoimien sekä sytytystapahtuman aiheuttamat herätteet vaikuttavat koko moottorissa. Moottorin rakenteet saavat herätteitä myös muiden moottoriosien toiminnasta, mutta herätteet eivät vaikuta koko moottoriin. Niillä saattaa kuitenkin olla paikallisesti hyvinkin suuri vaikutus. Esimerkkejä paikallisista herätelähteistä ovat hammasvaihteisto, venttiilimekanismi, nokka-akseli ja putkistojen paineiskut. Paikalliset herätteet eivät yleensä ole riippuvaisia moottorin kertaluvuista, vaan niiden tuottama heräte määräytyy yksilöllisesti. Tällöin voi muodostua tilanne, jossa moottoriheräte ja paikallinen heräte vaikuttavat samalla taajuudella, jolloin niiden vaikuttama voima summautuu.

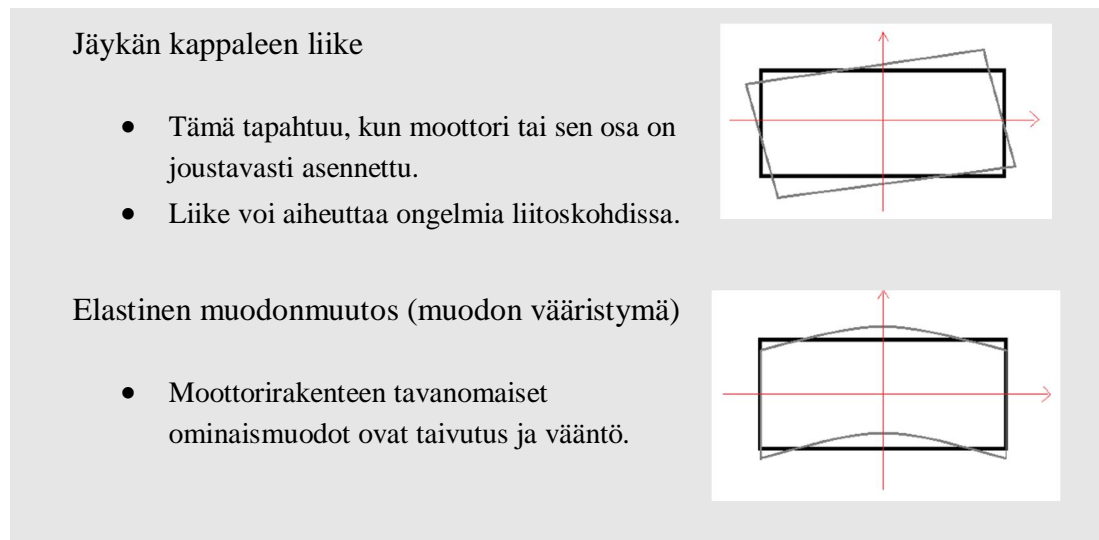
Ominaistaajuus ja -muoto

Rakenteen massa, jäykkyys ja vaimennus ovat ominaisuuksia, jotka vaikuttavat sen ominaistaajuuksiin ja -muotoihin (kappale 3.2). Jos rakenteeseen vaikuttava heräte toimii rakenteen ominaistaajuudella, kappaleen sanotaan olevan resonanssissa. Tämä tilanne voi johtaa erityisen suuriin värähtelytasoihin. Moottorirakenteessa resonanssitilat eivät ole toivottuja, sillä voimakas värähtely voi aiheuttaa rakenteen tai siihen kiinnitetyn komponentin rikkoutumisen.

Resonanssitilanne voidaan välttää muuttamalla herätettä tai rakenteen ominaistaajuutta. Herätteiden muuttaminen on vaikeaa, sillä ne ovat yleensä toiminnallisten koneenosien aiheuttamia ja siten väistämättömiä. Useasti päädytään muuttamaan värähtelevän rakenteen ominaistaajuutta. Taajuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla rakenteen massaa tai jäykkyyttä. Massan lisääminen rakenteeseen pienentää ominaistaajuutta, kun taas jäykkyyden lisääminen suurentaa sitä. Se, mikä on käytännöllisin tapa vaikuttaa ominaistaajuuteen, on ratkaistava tapauskohtaisesti. Joskus lisämassan liittäminen rakenteeseen on yksinkertaista ja toisinaan ripojen lisääminen on parempi vaihtoehto.

Vaste

Värähtelevän kappaleen käyttäytyminen voidaan jakaa kahteen erilaiseen liikkeeseen: jäykän kappaleen liikkeeseen ja elastisiin muodonmuutoksiin. Jäykän kappaleen liike määritellään siten, että kappaleen minkä tahansa kahden pisteen välinen etäisyys ei muutu. Muodonmuutoksessa pisteiden etäisyys muuttuu. Alla olevaan kuvaan 12 on listattu moottorirakenteen käyttäytymiselle tunnusomaisia asioita.

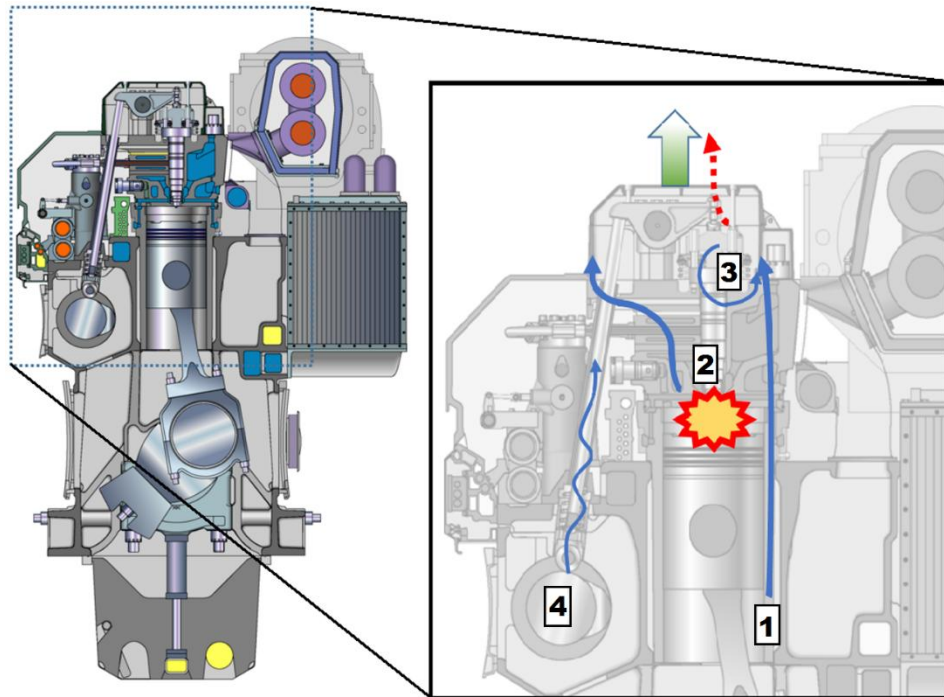


Kuva 12. Moottorirakenteen tyypilliset värähtelytavat.

Värähtelymittauksessa mitataan aina rakenteen vastetta. Mittausten perinteisiä keinoja käytiin läpi jo kappaleessa 3.2. Mittauksia analysoimalla voidaan selvittää myös kappaleen liikettä. Menetelmä perustuu värähtelysignaalien tuntemiseen useasta kappaleen pisteestä, jotka valitaan niin, etteivät ne sijaitse samalla pysty- tai vaakasuuntaisella linjalla. Jos signaalien välinen vaihe on sama, kappale liikkuu jäykästi. Vastaavasti, jos signaalit eivät ole vaiheessa, silloin kappale värähtelee jollain ominaismuodolla.

4.2 Värähtelyn eteneminen

Runko- ja ilmajäntien eroavaisuuksia käsiteltiin kappaleessa 3.1, jossa todettiin, että erot ovat äänen syntytavassa ja sen kulkemassa reitissä. Sylinterikannen kohdalla ilmajänteksi voidaan ajatella ääni, joka muodostuu sylinterikannen sisällä ja tulee kannen läpi. Muut äänet ovat tulkittavissa runkoääniksi, sillä niiden heräte saa sylinterikannen värähtelemään ja värähtely muuntuu ääneksi kannen säteilytehokkuuden mukaan. Kuvassa 13 on esitetty runko- ja ilmajäntien mahdollisia syntypaikkoja ja reittejä sylinterikanteen. Siniset nuolet kuvaavat herätteiden leviämistä moottorirakenteessa, minkä seurauksena sylinterikansi värähtelee ja syntyy runkoääni (vihreä nuoli). Mahdolliset runkoäänen herätteet voivat aiheutua kampiakselin liikkeestä (1), palamisprosessista (2), venttiilikoneiston värähtelystä (3) tai nokka-akselin välittämästä hammasvaihteen värähtelystä (4). Punainen nuoli kuvaa ilmajäntä, joka etenee sylinterikannen läpi.



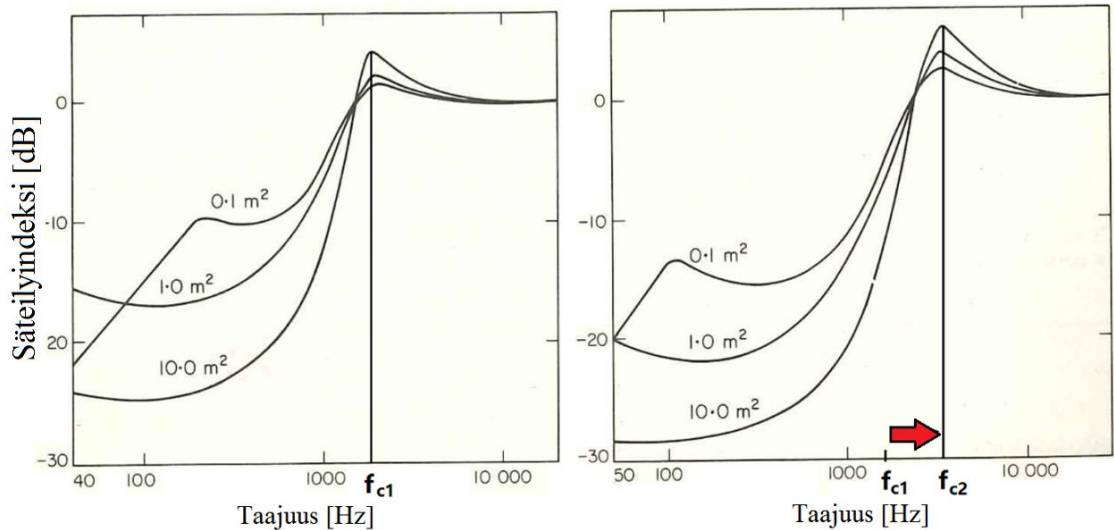
Kuva 13. Ilma- ja runkoäänten eteneminen moottorirakenteessa sylinterikanteen.

Yleisesti tarkasteltuna teräksisen moottorilohkon ja alumiinista valmistetun sylinterikannen kautta värähtely etenee tehokkaasti [12]. Rakenteen vaimennus on vähäistä myös liitospinnoissa, koska sylinterikansi on kiinnitetty pultein moottorilohkoon.

4.3 Äänen säteily

Äänen säteilyllä tarkoitetaan rakenteen kykyä muuntaa värähtelyenergiaa ääneksi (kappale 3.1). Esitetyt teoriat toimivat yksinkertaisissa tilanteissa, mutta monimutkaiselle rakenteelle äänen säteilyn laskeminen on jo vaikeaa. Kehittyneellä akustiikan mallinnusohjelmalla se voisi onnistua. Tässä työssä äänen säteilyä tutkittiin kuitenkin rakenteen kriittisen taajuuden avulla.

Kriittinen taajuus on riippuvainen rakenteen massasta ja taivutusjäykkyydestä (kaava 11). Alumiininen sylinterikansi on suhteellisen kevyt ja jäykkä, joten rakenne säteilee hyvin ääntä. Massan ja jäykkyyden muutoksen voi nähdä kuvan 14 esimerkistä, jossa säteilyindeksi on laskettu 6,35 mm (vasen) ja 3,18 mm (oikea) paksuisille teräslevyille. Kuvista ilmenee myös pinta-alan vaikutus säteilyindeksiin, kun levyn paksuus säilyy samana.



Kuva 14. Metallilevyjen säteilytehokkuudet metallilevyille, joiden paksuus on 6,35 mm (vasen) ja 3,18 mm (oikea). (muok. lähteestä [20])

Kriittiset taajuudet f_{c1} (~1500 Hz) ja f_{c2} (~3000 Hz) on merkitty kuviin. Kun levyn paksuus pienenee, sekä rakenteen massa että jäykkyys vähenevät. Ohuemman levyn kriittinen taajuus suurenee noin 1500 Hz (logaritminen asteikko), kun sitä verrataan paksumpaan levyyn. Massan vähentämisellä pitäisi olla kriittistä taajuutta pienentävä vaikutus, mutta taajuus kuitenkin suurentuu. Voidaan sanoa, että tämän teräslevyn kohdalla jäykkyyden muutoksella on suurempi vaikutus kriittiseen taajuuteen kuin massan muutoksella. Pienemmän jäykkyyden omaavan levyn kriittinen taajuus suurenee eli kyky säteillä ääntä huononee. Rakenteen jäykkyyden muutos voidaan tehdä vaihtamalla käytettyä materiaalia.

Tässä työssä tutkittiin eri materiaalien kykyä säteillä ääntä (kappale 8.2). Tuloksia analysoitiin laskemalla äänen intensiteettitason (SIL) ja värähtelynopeustason (L_v) erotus K_{I-V} (epävirallinen). Tasoarvot mitattiin yksittäisille pisteille, jotta äänen intensiteettiä ja värähtelynopeutta voitiin vertailla. Lasketusta K_{I-V} -arvosta ei voitu suoraan tehdä johtopäätöksiä kappaleen kyvystä säteillä ääntä, koska tasoarvot mitattiin vain yhdestä pisteestä. K_{I-V} mahdollistaa kuitenkin materiaalien vertailun, jos materiaalikappaleiden muoto ja niiden saama heräte on sama.

5. TEHDYT MITTAUKSET

Tässä työssä moottorin ääntä ja värähtelyä tutkittiin monin erilaisin mittauksin, jotka on esitetty taulukossa 4. Mittausten tarkoitukset jaettiin karkeasti kolmeen ryhmään:

- * Lähtötilanteen arviointi
- ** Sylinterikansien suuren melutason syyt
- *** Sylinterikansien tuottama melu erilaisissa tilanteissa

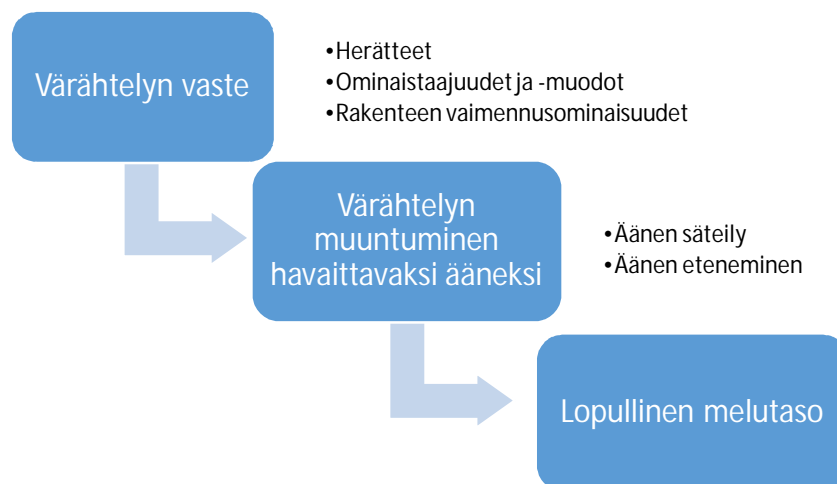
Taulukko 4. Tässä työssä tehdyt ja esitetyt ääni- ja värähtelymittaukset

Moottori/muu kohde	Tarkoitus	Mittalaitteet				Huomioita
		S&P	PP-Probe	SPL	Värähtely	
W8L32 E	**	X				Mittausetäisyyden vaikutus
W9L32 E	*, **	X	X	X		Koko moottorin melumittaus (PP-probe)
W6L32 CR	*, **, ***	X				A-puoli ja moottorin yläosa (S&P)
W8L34 DF	*, **, ***	X			X	Moottorin yläosa (S&P) Sylinterikansien värähtely
W16V34 DF	**, ***	X	X			Sylinterikansien lähikenttämittaus
W8V31	***	X				Ylimääräisen suojan vaikutus
W6L34 DF	*, ***		X	X		A-puoli (PP-probe)
W6L32 CR	**				X	Sylinterikansien ominaistaajuudet
Komposiitti testilevyt	**				X	Materiaalin värähtelyn vaimennuskyky
W6L32	**	X	X	X	X	Komposiittimat. testaus Nopeus pyyhkäisy
W9L32	**	X	X	X	X	Komposiittimat. testaus Potkurikäyrä
Lyhenteiden selitykset						
W#:	# on sylintereiden lukumäärä	E:	Uusin versio W32-moottorista			
L/V:	Rivimoottori / V-moottori	CR:	Yhteispaineruiskutus (common rail)			
32/34:	Sylinterin halkaisija (cm)	DF:	Voidaan käyttää dieseliä tai kaasua polttoaineena (dual fuel)			

Mittauksia tehtiin kymmenelle moottorille ja erilaisille testilevyille taulukon 4 mukaisesti. Mittauksissa käytettiin neljää erilaista mittaustapaa, joista kolmella mitattiin ääntä: Scan & Paint (S&P), perinteinen äänen intensiteettimittaus (PP-probe) ja äänenpainemittaus (SPL). Lisäksi joissakin kohteissa mitattiin rakenteiden värähtelyä. Huom. Kaikki mittaukset sisälsivät äänen intensiteetin mittauksen sylinterikansien alueelle; muut tehdyt mittaukset on merkitty taulukon huomioihin.

Lähtötilanteen arviointi (*) tehtiin usealle moottorille ja usealla eri mittaustavalla. Tarkoituksena oli selvittää moottorin meluavain osa-alue. Koko moottorin mittaukset suoritettiin PP-probe:lla. Tällöin intensiteettimittaukset tehtiin moottorialueille, jotka on esitetty kuvassa 3. S&P-mittaustulokset on mahdollista esittää värikarttojen avulla, joilla pystyy selvittämään visuaalisesti moottorin meluavimmat kohdat.

Sylinterikansien suuren melutason syyt (**) selvitettiin lähtötilanteen arvioinnissa saatujen tuloksen perusteella. Suurin osa tutkimuksen mittauksista tehtiin tämän asian selvittämiseksi. Lopulliseen melutasoon johtavat syyt on esitetty kuvassa 15. Sylinterinkansiin vaikuttavien herätteiden ja kannen ominaistajuuksien tunteminen oli tärkeää, jotta tiedettiin, miten rakenne värähtelee ja mikä sen aiheuttaa. Värähtely ei aina muunnu täysin ääneksi, joten värähtelevän rakenteen äänen säteilykyky ja äänen eteneminen rakenteesta poispäin täytyi selvittää.



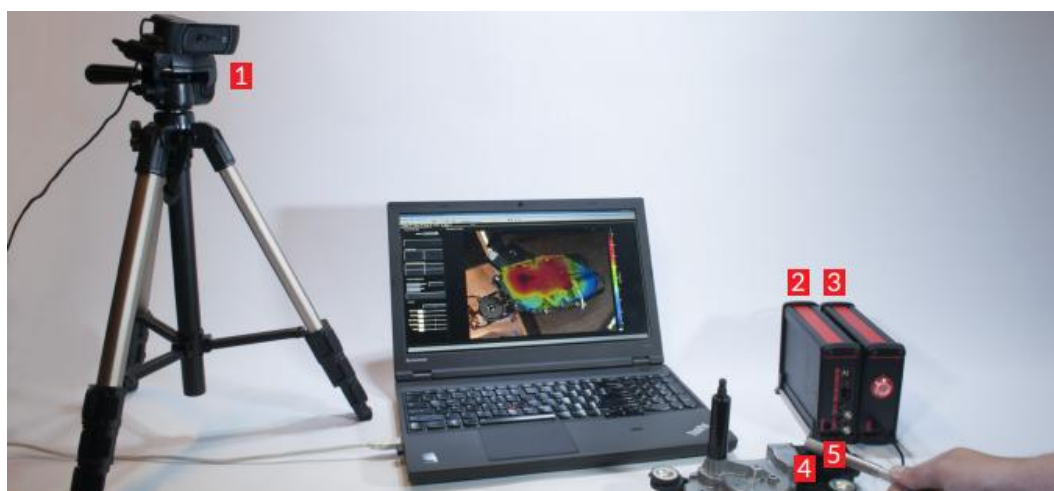
Kuva 15. Tapahtumat värähtelevän rakenteen ja sen aiheuttaman lopullisen melutason välillä.

Sylinterikansien tuottamaa melua eri tilanteissa (***) tutkittiin myös. Tarkoituksena oli kerätä lisätietoa sylinterikansien tuottamasta äänestä, kun moottori käytti eri polttoainetta tai kun moottorin kuormaa tai pyörimisnopeutta muutettiin. Tällöin pystyttiin vaikuttamaan herätteeseen ja täten arvioimaan herätteen vaikutus moottorimeluihin. Lisäksi tutkittiin sylinterikansien tuottaman melun vaihtelua sijainnin mukaan sekä melusuojan vaikutusta moottorin tuottamaan meluun.

6. MITTAUSJÄRJESTELYT

6.1 Scan & Paint

Tässä työssä Scan & Paint (valmistaja Microflown Technologies) -mittauksilla oli keskeinen osa, kun informaatiota moottorin tuottamasta melusta kerättiin. Koska kyseessä on uudehko akustiikan sovellus, käytössä oli muita mittaustapoja, jotta S&P-metodin luotettavuus voitiin arvioida. Mittalaite on ensimmäinen kaupallinen sovellus akustisen hiukkasnopeuden mittaamiseksi, mikä mahdollistaa melulähteen tarkemman analysoinnin. Järjestelmän ydin on niin kutsuttu PU-probe, jossa sijaitsevat hiukkasnopeuden (U) ja äänenpaineen (P) anturit. Mittaukseen tarvittavat komponentit on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Scan & Paint -mittauksessa käytetyt komponentit. [5]

Scan & Paint -mittauskomponentit:

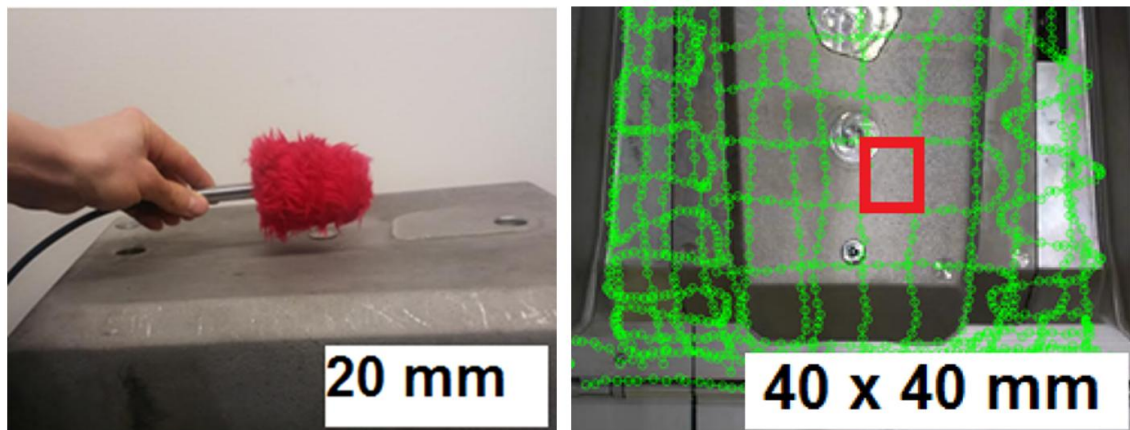
1. Kamera
2. Tiedonkeruulaite – Scout, tarkkuus 24 bit, 4 kanavaa
3. Signaalimuunnin - MFPA-2, esivahvistin antaa virran PU-probe:lle
4. PU probe – laajakaista-anturi kattaa 20 Hz -10 kHz taajuusalueen
5. Värimerkki – käytetään mitatun tiedon paikantamiseen

Mitatut hiukkasnopeuden ja äänenpaineen aicasignaalit paikannetaan videoleikkeen ja PU-probe:ssa olevan värimerkin avulla. Tällöin mittaustulokset voidaan esittää havainnollisesti värikarttojen avulla, joista esimerkiksi melulähteen paikannus onnistuu nopeasti ja tarkasti.

Scan & Paint -mittaukset

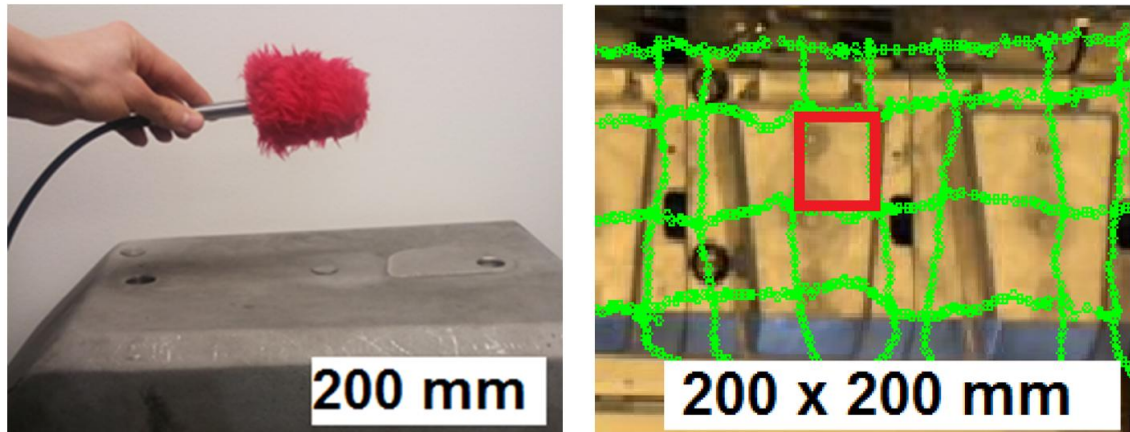
Koska kyseessä on suhteellisen uusi akustiikan sovellus, S&P-mittausten tekemiseen ei ole virallista standardia. Tässä työssä käytettiin kahta erilaista mittaustapaa riippuen siitä, mitä melulähteestä haluttiin tutkia. Melun tarkkaan paikallistamiseen ja äänen intensiteetin määrittämiseen käytettiin eri mittausetäisyyttä ja myös mittauspisteiden lukumäärä oli erisuuruinen. Mittaukset suoritettiin pyyhkäisemällä, mikä tarkoittaa sitä, että PU-probea kuljetettiin tasaisella nopeudella mitattavan pinnan suuntaisesti. Pyyhkäisy tehtiin pysty- ja poikittaissuunnissa, joten mittauspisteistä muodostui verkko. Verkon tiheys määrää mittauspisteiden lukumäärän, mikä vaikuttaa melulähteen paikantamisen tarkkuuteen.

Melun paikallistamisessa mittaus tehtiin lähellä mitattavaa kohdetta häiriöiden minimoimiseksi. Mittausetäisyys oli tällöin noin 20 mm ja mittauspisteiden muodostama verkko oli suhteellisen tiheä, noin 40 mm x 40 mm (kuva 17).



Kuva 17. Äänen paikallistamiseen tarkoitettu mittausetäisyys (vas.) ja mittapisteverkon tiheys (oik.).

Äänilähteen pinnalla eli akustisessa lähikentässä äänikenttä on vaihteleva, jolloin myös äänen intensiteetti vaihtelee. Luotettavampia ja toistettavampia tuloksia saadaan, kun käytetään pidempää mittausetäisyyttä. Äänen intensiteettiä määrittäessä mittausetäisyys oli noin 200 mm ja mittapisteverkon verkko on noin 200 mm x 200 mm (kuva 18).



Kuva 18. Äänen intensiteetin määrittelyyn tarkoitettu mittausetäisyys (vas.) ja mittapisteverkon tiheys (oik.).

Pyyhkäisymittaus kesti noin 2-5 minuuttia ja tällöin mittauspisteitä kertyi useita tuhansia. Mittauksen kesto on riippuvainen mittaustavasta ja mitattavan melulähteen pinta-alasta. Mittaustulokset voidaan esittää värikarttana, jonka tarkasteltavaksi suureeksi voidaan valita hiukkasnopeus, äänenpaine tai äänen intensiteetti.

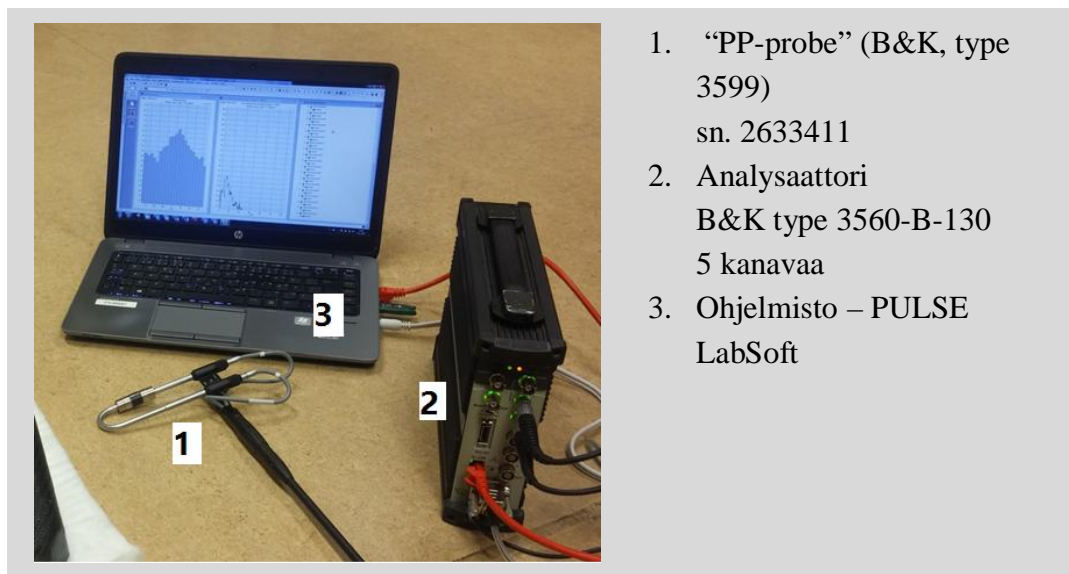
6.2 Äänen intensiteetti

Äänen intensiteetin määrittämiseksi käytettiin kahta erilaista mittalaitetta. S&P-mittalaite esitettiin luvussa 6.1. Perinteisesti äänen intensiteettiä on mitattu kahden painemikrofonin yhdistelmällä, jota kutsutaan tässä työssä PP-probe:ksi (pressure-pressure). Intensiteetin laskemiseksi tarvitaan tieto hiukkasnopeudesta, joka määritetään PP-probe:lla kahteen painemikrofoniin tulevan äänenpainesignaalin vaihe-eron avulla. Mittalaitteen valmistaja on Brüel & Kjær. Perustietoa intensiteettimittauksista on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Scan & Paint ja PP-probe -mittalaitteiden ominaisuudet

	Scan & Paint	PP-probe
Taajuuskaista	20 Hz – 10 kHz	125 Hz – 5 kHz
Melutason yläraja	135 dB	162 dB
Näytteenottotaajuus	26 000 (max 48 000)	51200

Vaikuttavin ero näiden kahden laitteen välillä on mittaustulosten taajuuskaistoissa. PP-probe:n luotettava taajuusväli on riippuvainen mikrofoniin etäisyydestä. Tämän työn mittauksissa käytetty mikrofoniin etäisyys oli 12 mm, joka soveltuu parhaiten moottorimelun mittaamiseen. Kuvassa 19 on PP-probe-mittauksiin tarvittavat komponentit.



1. "PP-probe" (B&K, type 3599)
sn. 2633411
2. Analysaattori
B&K type 3560-B-130
5 kanavaa
3. Ohjelmisto – PULSE
LabSoft

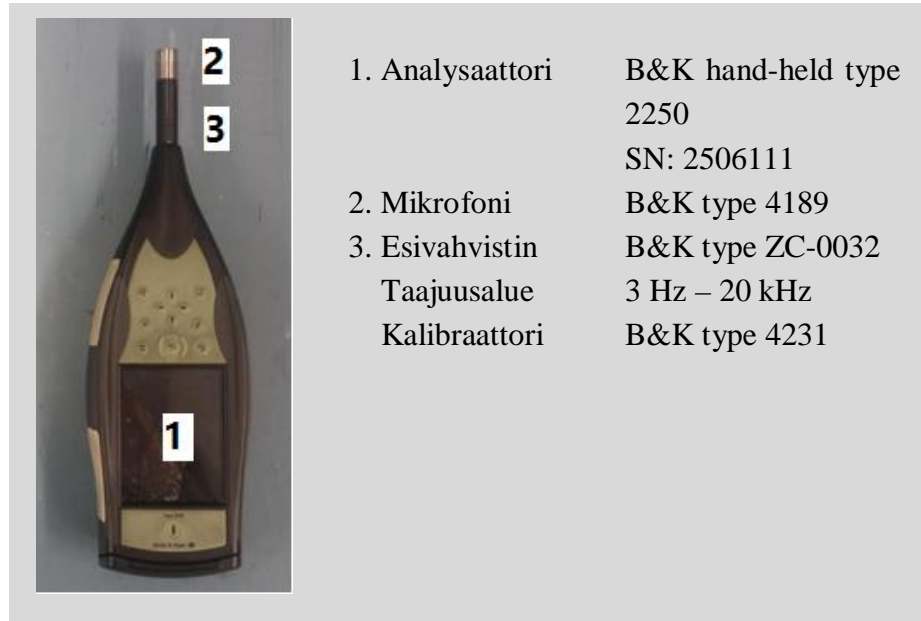
Kuva 19. PP-probe mittauksessa tarvittavat komponentit.

PP-probe-mittaukset tehtiin Wärtsilän sisäisen standardin mukaisesti, joka perustuu pääosin standardiin ISO 9614. Wärtsilän standardissa on muutoksia, koska äänen intensiteettimittaukset tehdään suurelle moottorille pienessä moottori- tai testihuoneessa, jossa kaikuinen ympäristö ja voimakkaat ulkoiset äänet voivat vaikuttaa mittauksiin. Häiritsevät tekijät pyrittiin minimoimaan tässä työssä esitettyjen äänimittausten kohdalla. Esimerkiksi testien aikana käytettiin vain mitattavaa konetta, joten muiden moottoreiden äänet eivät vaikuttaneet testituloksiin.

Mittaukset suoritettiin samaan tapaan kuin äänen intensiteettimittaukset S&P-mittalaitteella. Mittausetäisyys oli 200 mm ja pyyhkäisymittauksen muodostama verkko oli 200 mm x 200 mm. Mittausnopeus oli mittauksen aikana 0,1 m/s – 0,5 m/s.

6.3 Äänenpaine

Äänenpainemittaukset suoritettiin Wärtsilän sisäisen standardin mukaisesti, joka pohjautuu pääosin säädökseen MSC 91/22 ANNEX 1 ADOPTION OF THE CODE ON NOISE LEVELS ON BOARD SHIPS [6]. Wärtsilän standardi on vaativampi, koska äänimittaukset tehdään aina moottorin käydessä täydellä kuormalla. Jos mittaus tehtiin osakuormalla, se on erikseen mainittu. Tässä työssä käytettiin kannettavaa äänenpainetasomittaria (kuva 20), joka sisältää mikrofonin, esivahvistimen ja mittaustulosten analysointijärjestelmän.



Kuva 20. Äänenpainetasomittari (Brüel & Kjaer).

Äänenpainemittaukset tehtiin yhden metrin päässä moottorista moottorin nimellisellä kierrosnopeudella, joka oli 720 rpm tai 750 rpm moottorista riippuen. Yhden mittauksen kesto oli 15 s - 20 s, jolloin saatiin hyvä tarkkuus moottorin äänenpainemittaukselle.

6.4 Värähtely

Värähtelymittaukset tehtiin standardin ISO 10816-6 [21] mukaan, joka on kehitetty moottoriosille, jotka eivät pyöri. Standardi on tarkoitettu käytettäväksi moottoreille, joiden tehontuotto on yli 100 kW. Mittaukset suoritettiin kannettavalla Benstone impaqTM -mittalaitteella (kuva 21).

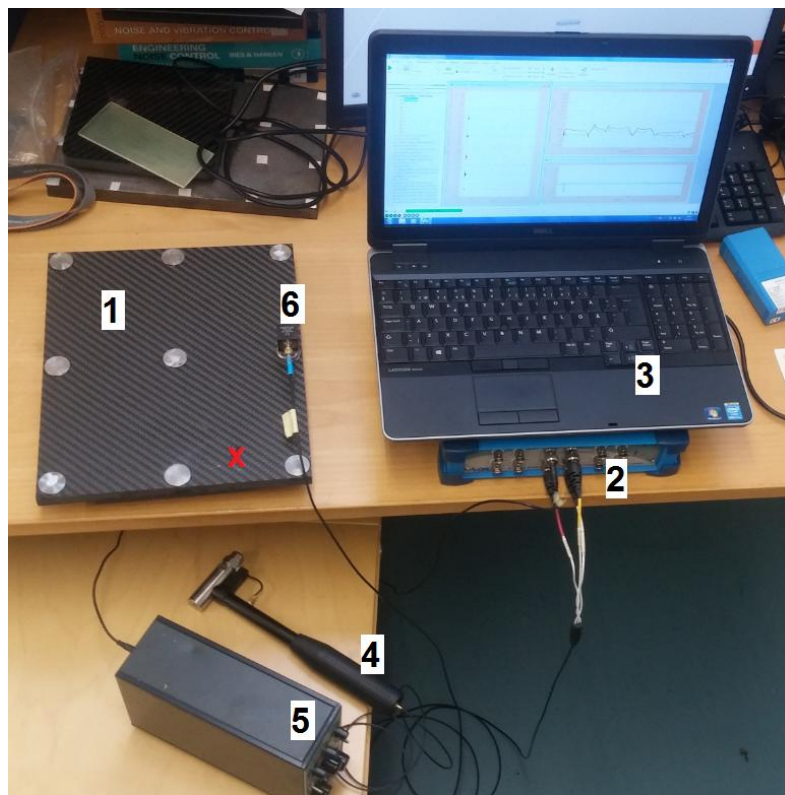


Kuva 21. Kannettava Benstone impaqTM -mittalaite.

Värähtelymittaukset tehtiin moottorin käydessä täydellä kuormalla ja nimellisnopeudellaan. Analysointori laski kymmenen mittauksen keskiarvon jokaiselle mittapisteelle, jolloin tuloksen vääristymä saatiin pieneksi.

Ominaistaajuus ja vaimennus

Tässä työssä määritettiin ominaistaajuudet ja vaimennuksen arvot sylinterikansille ja komposiittisille testilevyille. Testissä tutkittavalle kappaleelle annettiin impulssimainen heräte vasaralla ja kappaleen antama vaste mitattiin kiihtyvyyssanturilla. Vasarassa oli myös kiihtyvyyssanturi, joten annettu heräte ja vaste tunnettiin. Tuloksena saatiin rakenteen taajuusvastefunktio, josta halutut tiedot voitiin selvittää. Kuvassa 22 on esitetty tyypillinen mittauskokoontulo.



Kuva 22. Iskuvasaratestin mittauskokoontulo.

Taulukko 6. Iskuvasaratestissä käytetyt mittalaitteet

1 Testikappale	
Sylinterikansi	11 mittauspistettä
Komposiittilevy	9 mittauspistettä, lyöntipiste merkattu kuvaan x-merkillä
2 Analysaattori	
Sylinterikansi	B&K type 3560-B-1305
Komposiittilevy	OROS OR35, 8 channel
3 PC	NVGate ja PULSE ohjelmistot
4 Iskuvasara	Brüel & Kjær type 8202, muovikärki (0-2000 Hz), teräskärki (0-7000 Hz)
5 Mittausvahvistin	Brüel & Kjær type 2635, iskuvasaralle ja kiihtyvyyssanturille
6 Kiihtyvyyssanturi	
Sylinterikansi	Dytran 3055B1, 1 suunta, 10g + Kistler 8452A magneetti 19g
Komposiittilevy	Brüel & Kjær type 4393, 1 suunta, 2,2g, asennus mehiläisvahalla

Sylinterikannen mittaus suoritettiin kahteen kertaan: kannen ollessa asetettuna vaahtomuovin päälle ja asennettuna moottoriin. Iskuvasaran kärjen materiaali vaikuttaa rakenteeseen annetun herätteen taajuuksiin. Sylinterikannelle käytettiin teräskärkeä.

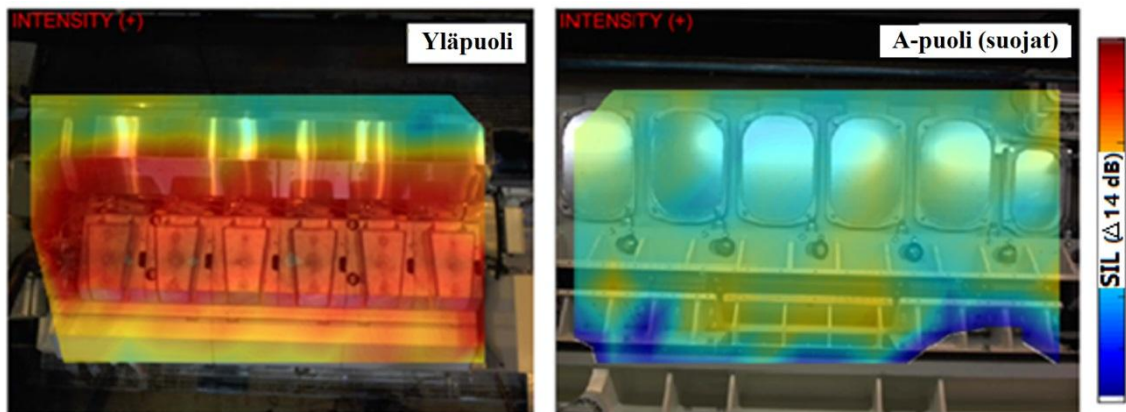
Komposiittilevyt olivat mittauksen ajan vaahtomuovin päällä ja herätteen antamisessa käytettiin muovikärkeä. Luotettavien tulosten saamiseksi valittiin erityisen kevyt kiihtyvyyssanturi B&K 4393. Raskaammat anturit, Kistler 8762 ja Kistler 8766, vaikuttivat selkeästi testilevyn ominaistaajuuteen. Kaikki iskuvasaratestit suoritettiin noin 20 asteen huonelämpötilassa.

7. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tulokset on jaettu kolmeen eri osa-alueeseen: lähtötilanteen arviointi, sylinterikansien suuren melutason syyt ja sylinterikansien tuottama melu eri tilanteissa. Moottoreiden yhteydessä käytetyt lyhenteet on selostettu kappaleessa 5.

7.1 Lähtötilanteen arviointi

Koko moottori W9L32 E mitattiin PP-probe:lla, josta saadut tulokset on esitetty liitteessä 1. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin tutkimuksen taustoissa (kappale 2) esitetyt lähtötiedot: yläosa on moottorin meluavin alue. Mittauksessa toiseksi meluavin osa-alue oli A-puoli. Moottorin W6L32 CR yläosan ja A-puolen tuottamaa melua mitattiin S&P-mittalaitteella, jolloin mittaustapana oli intensiteettimittaus. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 23, jossa näkyy äänen intensiteettitasen (SIL) värikartta moottorin yläosalle (vas.) ja A-puolen kampiakselin suojille (oik.). Värikartat on esitetty taajuusvälillä 25 Hz - 10 kHz.

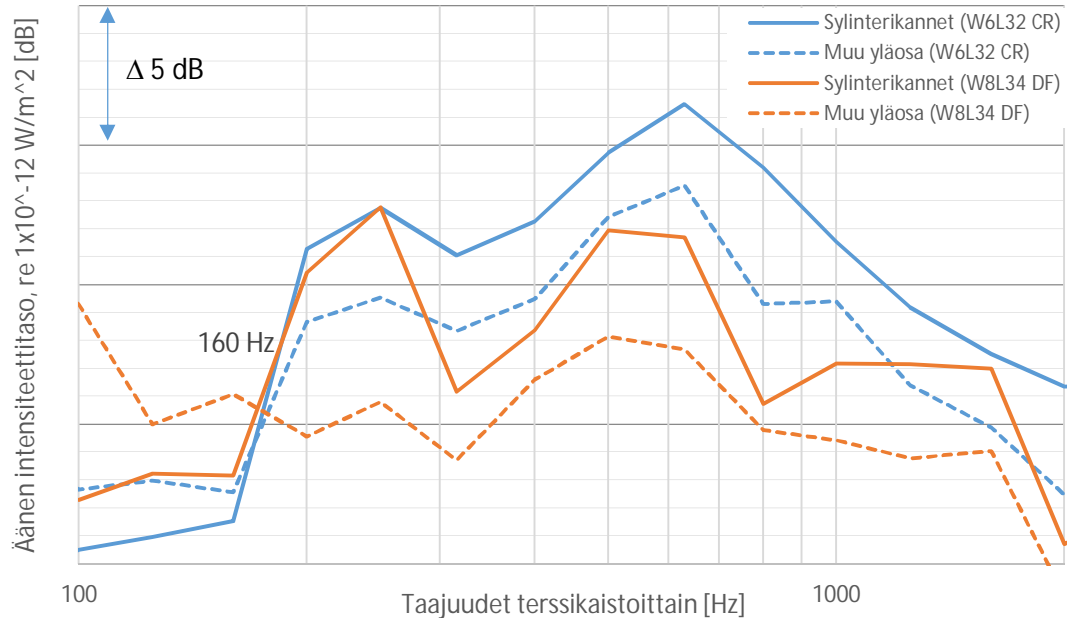


Kuva 23. Äänen intensiteettitasen värikartat moottorin W6L32 CR yläosalle (vas.) ja A-puolen kampiakselin suojille (oik.).

Vertailemalla intensiteettitasen värikarttoja on selvää, että moottorin yläosan tuottama melu on huomattavasti voimakkaampaa kuin A-puolen kampiakselin suojien tuottama melu. Laajakaistaisen tulosten perusteella voi sanoa, että mitattujen alueiden suurimpien intensiteettitasojen ero on enemmän kuin 5 dB. Yläosan melulla on siis suuri vaikutus koko moottorin melutasoon.

Moottorin yläosan intensiteetti ei kuitenkaan jakaudu tasaisesti, vaan nimenomaan sylinterikansien alue näyttäisi tuottavan suurimmat arvot kuvan 23 värikartassa. Moottoreiden W6L32 CR ja W8L34 DF (polttoaineena kaasu) yläosan melua tutkittiin tarkemmin S&P-intensiteettimittauksilla. Tulokset on esitetty kuvassa 24 erikseen sylinterikansien alueelle ja erikseen muille yläosan alueille, jotta sylinterikansien

vaikutus voidaan arvioida. Äänen intensiteettitasojen arvot on ilmoitettu terssikaistoittain taajuusvälillä 100 Hz – 2 kHz, koska näillä taajuuksilla tiedetään olevan suurin vaikutus kokonaisäänien muodostumiseen. [4]



Kuva 24. Moottoreiden W6L32 CR ja W8L34 DF yläosien tuottamat äänen intensiteettitasojen arvot.

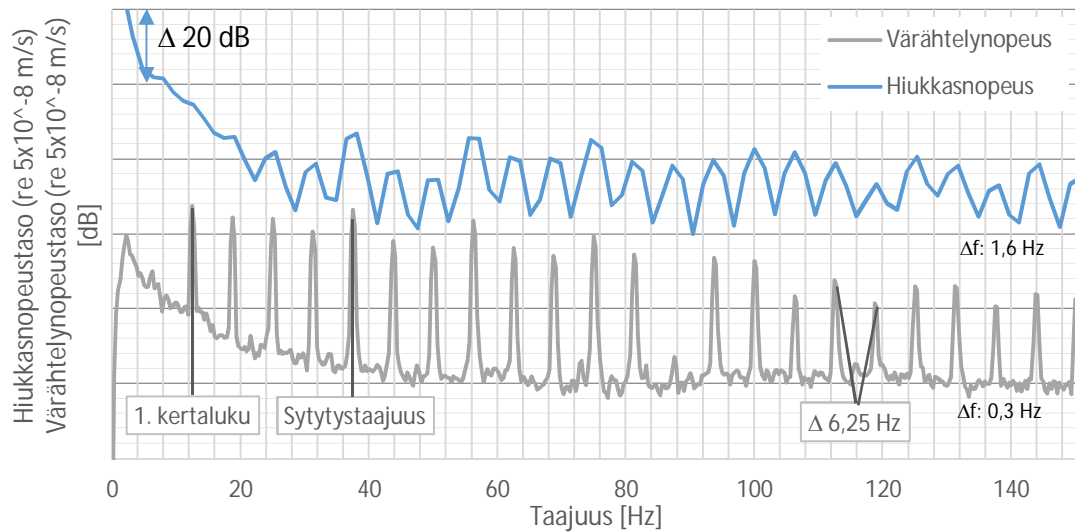
Sylinterikansien tuottama äänen intensiteettitaso on pääosin muita alueita suurempi. Tosin alle 160 Hz arvoilla tilanne on toinen, mutta intensiteettitasot eivät ole tällä taajuusalueella merkittävän suuret. Voidaan todeta, että sylinterikansien aiheuttama melu on merkittävin tekijä moottorin yläosan suurelle melutasolle ja samalla koko moottorin tuottamalle melulle.

7.2 Sylinterikansien suuren melutason syyt

Sylinterikansien aiheuttaman melun tutkiminen aloitettiin kansiin vaikuttavien herätteiden selvittämisellä ja tämän jälkeen tutustuttiin sylinterikansien ominaistaajuuksiin. Vasta, kun tiedettiin miten ja mistä syystä kappale värähtelee, voitiin tutkia värähtelyn muuntumista ääneksi ja sen kulkeutumista rakenteesta pois päin. Tässä työssä sylinterikannet numeroitiin alkaen moottorin vauhtipyörän päästä.

Herätteet

Moottoriherätteiden selvittämiseksi W6L32 moottorin toisen sylinterikannen hiukkas- ja värähtelynopeustaso mitattiin samasta pisteestä. Tulokset on esitetty kuvassa 25, jossa tarkastellaan pieniä taajuuksia taajuusvälillä 0 Hz - 150 Hz.

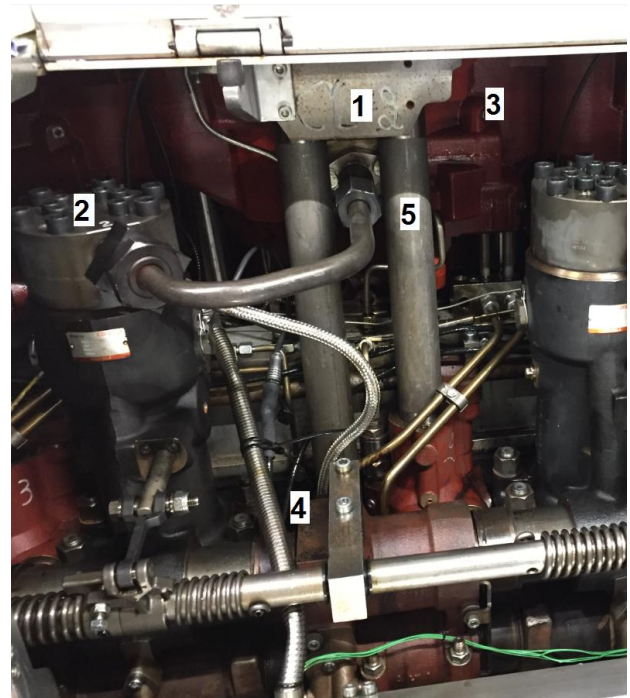
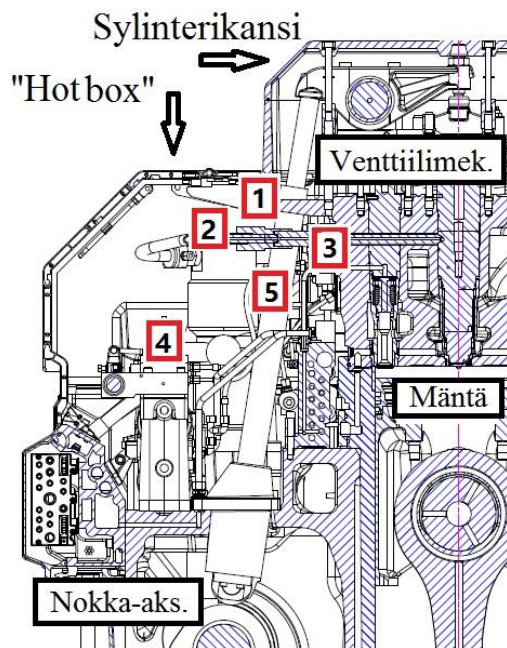


Kuva 25. Moottorin W6L32 moottoriherätteiden tarkastelu hiukkas- ja värähtelynopeustasojen avulla.

Kuvaan 25 on merkitty moottorin ensimmäinen kertaluku, jonka taajuus on 12,5 Hz (750 rpm/60 s). Muut kertaluvut ja kertalukujen puolikkaat erottuvat värähtelynopeustason arvojen piikkeinä; samoille taajuuksille sijoittuvat myös hiukkasnopeustason huippuarvot. Moottorin W6L32 sytytystaajuus on sen kolmannella kertaluvulla (sylinterimäärä/2), mikä tarkoittaa 37,5 Hz taajuutta. Tällä taajuudella hiukkas- ja värähtelynopeustaso saavat hieman suurempia arvoja kuin muiden kertalukujen arvoilla.

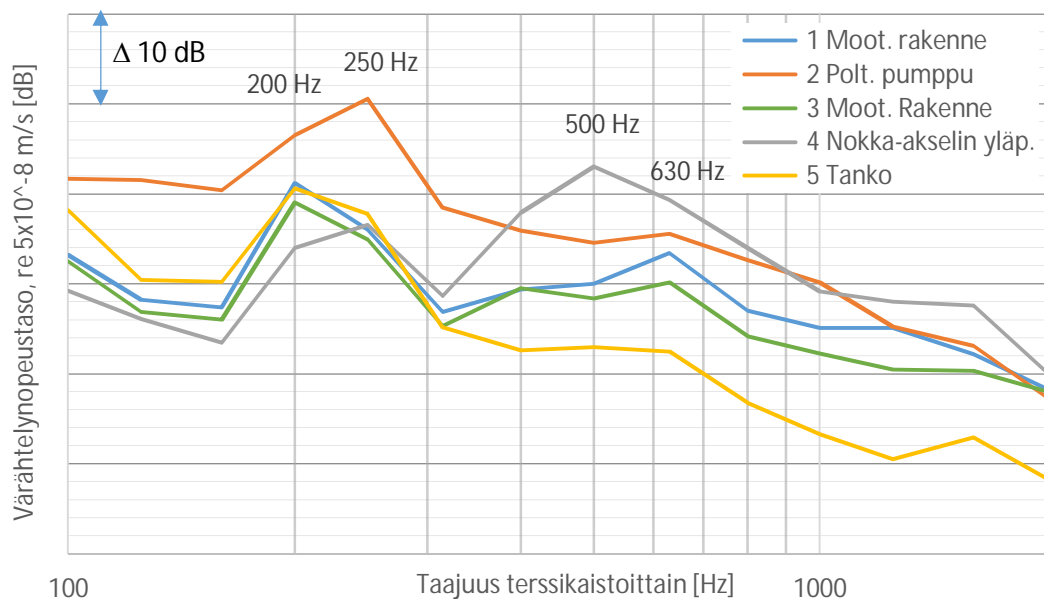
Pienten taajuuksien tuottama melu ei vaikuta moottorin kokonaismeluun, koska kuulonmukainen A-painotus (kuva 5) vähentää voimakkaasti melutasoja pienillä taajuuksilla. Moottoriherätteet jatkuvat kuitenkin puolen kertaluvun askeleilla koko taajuuskaistan läpi. Moottorilla W6L32 puoli kertalukua on 6,25 Hz. Nämä kertaluvut johtuvat palamisprosessin aiheuttamista kaasuvoimista (taulukko 3). Suuremmilla taajuuksilla herätteen voimakkuus heikkenee, mutta on tärkeä tietää, että moottoriherätteet vaikuttavat sylinterikansiin koko taajuuskaistalla puolen kertaluvun välein.

Sylinterikansiin vaikuttavia paikallisia herätteitä tutkittiin suorittamalla värähtelymittauksia moottorille W6L32. Mittapistet valittiin sylinterikansien läheisyydestä, jotka on merkitty kuvaan 26. Pisteet 1 ja 3 olivat sylinterikannen alla olevassa moottorirakenteessa. Piste 2 sijaitsi polttoainepumpun päällä ja piste 4 nokka-akselin päällä olevassa rakenteessa. Piste 5 sijaitsi tangossa, joka yhdistää nokka-akselin ja venttiilimekanismin.



Kuva 26. Paikallisten herätteiden tutkimiseen käytetyt mittauspisteet 1-5. Moottorin poikkileikkauskuva vasemmalla ja näkymä, kun "hotbox" luukut ovat auki, oikealla.

Värähtelymittausten tulokset on esitetty kuvassa 27, jossa värähtelynopeustasot mittauspisteille on esitetty terssikaistoittain taajuuksilla 100 Hz – 2 kHz. Mittaukset suoritettiin 2. ja 5. sylinterikansien alueilla ja esitetyt tulokset ovat keskiarvoja näiden alueiden värähtelyarvoista.



Kuva 27. Sylinterikannen ympäristön (pisteet 1-5) värähtelynopeustasot.

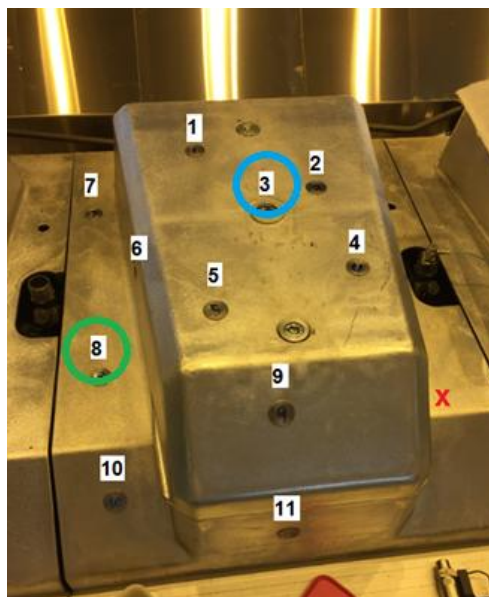
Terssikaistan taajuuksilla 200 Hz ja 350 Hz värähtelynopeustaso saa suuria arvoja kaikissa mittauspisteissä. Polttoainepumpun arvot ovat selkeästi muita suuremmat. Koska kaikki mittauspisteet aktivoituvat, kyseessä on jokin moottorin yläosaan kokonaisvaltaisesti vaikuttava tekijä: joko heräte tai suuremman moottoriosan ominaistaajuus.

Suuri arvo saavutetaan myös mittauspisteessä 4 terssikaistan arvolla 500 Hz. Tällöin muut pisteet eivät saa suuria arvoja, joten ilmiö on paikallinen. Mittauspiste 4 sijaitsee nokka-akselin läheisyydessä. Teho nokka-akselille jaetaan hammaspyörästön avulla, joten hammaskontaktissa aiheutuva värähtely voisi olla syy paikalliselle herätteelle.

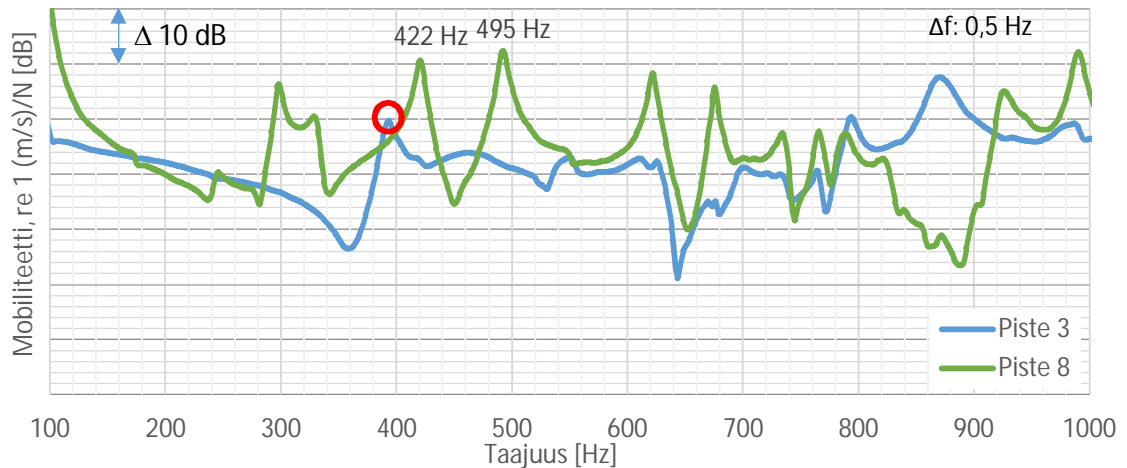
Moottorirakenteen pisteet 1 ja 3 sijaitsevat suoraan sylinterikannen alla, joten niillä on suuri vaikutus sylinterikannen värähtelyyn. Näiden pisteiden värähtelynopeustasojen arvot kohoavat terssikaistan taajuudella 630 Hz. Syynä arvojen kohoamiseen voi olla venttiilikoneiston aiheuttama paikallinen heräte.

Ominaistaajuudet

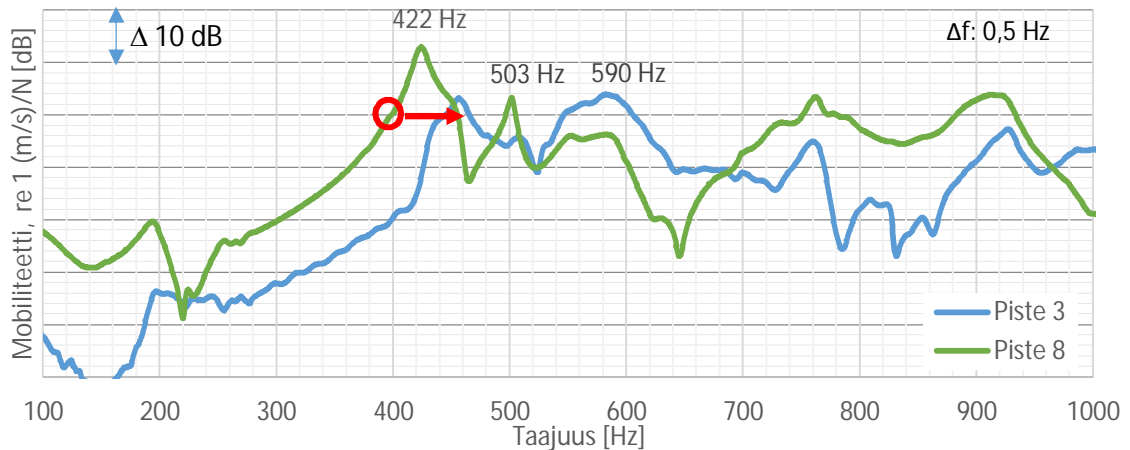
Ominaistaajuudet määriteltiin iskuvasaratestillä moottorin W6L32 CR sylinterikannelle. Moottori ei ollut testin aikana käynnissä. Mittaukset suoritettiin, kun kansi oli vapaasti asetettuna vaahtomuovin päälle ja asennettuna moottoriin. Mittauspisteet 1-11 ja lyöntipiste "x" on merkitty kuvaan 28. Mittaustulokset pisteistä on esitetty liitteessä 2. Tuloksissa huomattiin pisteiden 3 ja 8 saavan suurimpia arvoja. Näiden pisteiden tulokset on esitetty kuvassa 29, kun sylinterikansi on vapaa ja kuvassa 30, kun kansi on asennettuna moottoriin. Tulokset taajuusvälillä 100 Hz – 1 kHz on esitetty mobiliteetin avulla, joka ilmoittaa desibeliasteikoilla annetun herätteen ja saadun vasteen suhteen.



Kuva 28. Sylinterikannen iskuvasaratestin mittauspisteet 1-11 ja lyöntipiste "x".



Kuva 29. Vapaan sylinterikannen mobiliteetti.



Kuva 30. Moottoriin asennetun sylinterikannen mobiliteetti.

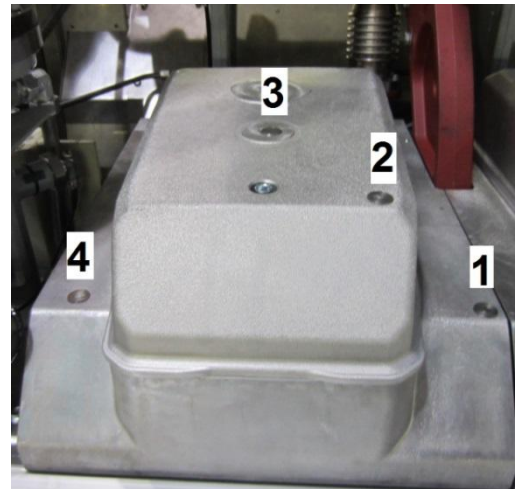
Kun sylinterikansi on asennettuna vapaasti, mobiliteetti saa useita piikkejä tutkittavalla taajuusvälillä eli sylinterikannella on useita ominaistaajuuksia näiden taajuuksien alueella. Sylinterikannen ollessa kiinnitettynä moottoriin sen arvot pääosin vaimenevat ja jotkin suuret arvot häviävät kokonaan. Esimerkiksi mittauspisteen 8 arvo pienenee noin 500 Hz taajuudella 10 dB, kun sylinterikansi asennetaan moottoriin. Syy tähän on rakenteen jäykistyminen, kun kansi kiinnitetään kahdella pultilla moottorirakenteeseen. Suuri mobiliteetin arvo taajuudella 422 Hz ei kuitenkaan muutu, koska mittauspiste 8 sijaitsee ikään kuin ulokkeessa, johon perusrakenteen jäykkyyden muuttuminen ei välttämättä vaikuta.

Mittauspisteen 3 suuri mobiliteetti on merkitty punaisella ympyrällä kuviin. Sen taajuus kasvaa yli 40 Hz, kun sylinterikansi on asennettuna moottoriin. Mittauspiste sijaitsee keskellä sylinterikannen rakennetta, joten asennuksesta johtuva rakenteen jäykkyyden lisääntyminen vaikuttaa nostavasti ominaistaajuuksiin. Pisteen 3 mobiliteetti saa suuria arvoja myös taajuudella 590 Hz, kun sylinterikansi on asennettuna moottoriin. Vapaan kannen tapauksessa tällä alueella ei ollut selkeää ominaistaajuutta, joten sylinterikannen jäykkyyden muutokset vaikuttavat erityisesti sen keskiosan värähtelyyn.

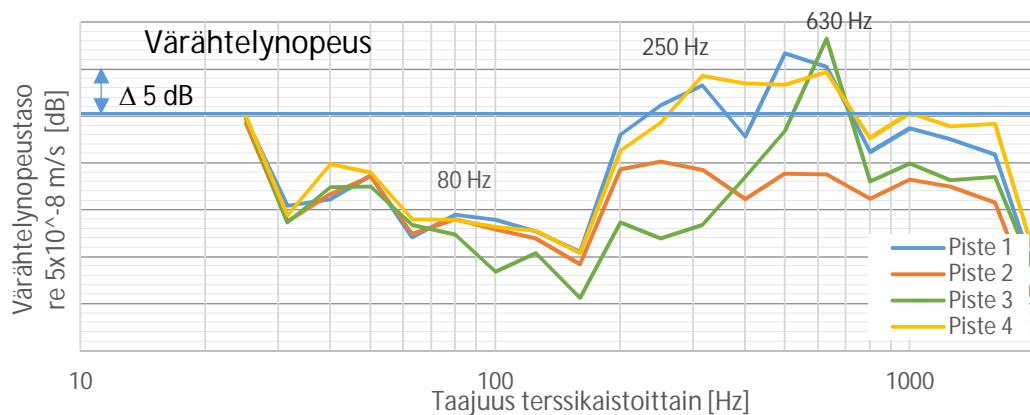
Äänen säteily

Sylinterikansien kykyä säteillä ääntä tutkittiin värähtely- ja hiukkasnopeusmittauksin. Tutkitun W8L34 DF moottorin 4. sylinterikannen mittauspisteet on esitetty kuvassa 31. Mittauksen aikana moottorin käyttämä polttoaine oli diesel.

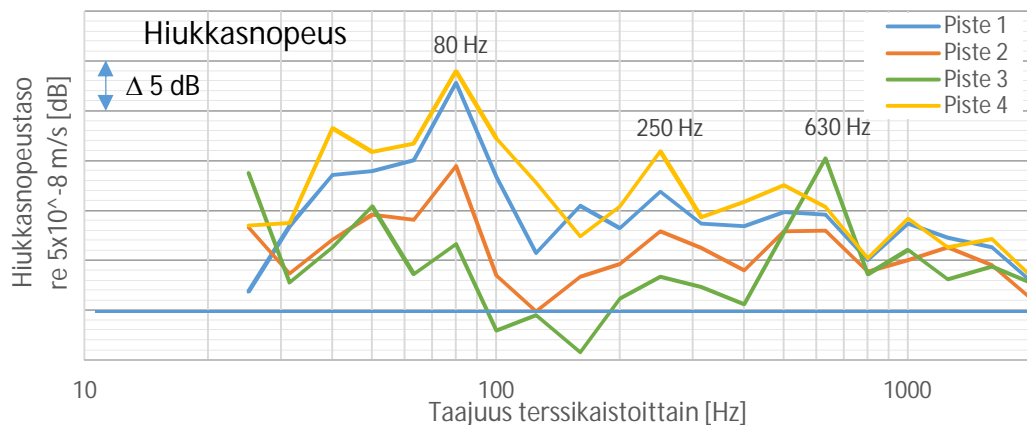
Kuvassa 32 on esitetty värähtelynopeustaso terssikaistoittain kaikissa mittauspisteissä ja kuvassa 33 vastaavien pisteiden hiukkasnopeustasot. Hiukkasnopeuksien arvot mitattiin pinnan lähellä (noin 20 mm pinnasta), jotta häiriöiden vaikutus saataisiin minimoitua.



Kuva 31. Sylinterikannen mittauspisteet.



Kuva 32. Sylinterikannen (W8L34 DF) värähtelynopeustasot mittapisteissä 1-4.



Kuva 33. Sylinterikannen (W8L34 DF) hiukkasnopeustasot mittapisteissä 1-4.

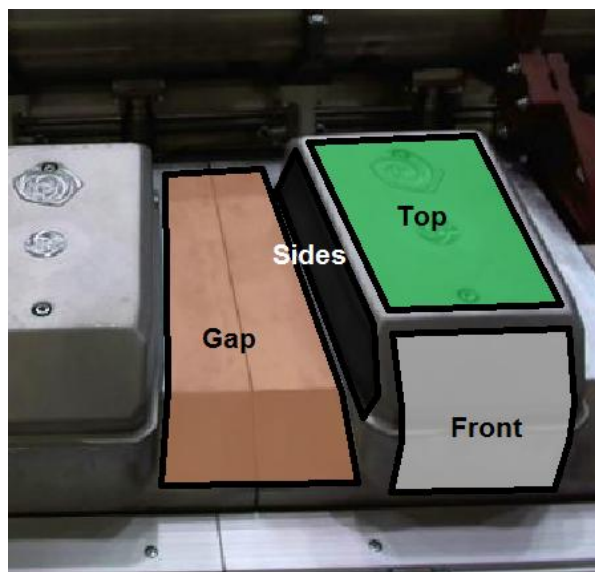
Kuvissa 32 ja 33 tummennettu vaakaviiva on merkitty samalle nopeustason arvolle. Hiukkasnopeustaso saa keskimäärin 10 dB – 20 dB suurempia arvoja kuin värähtelynopeustaso. Suurempi hiukkasnopeustaso johtuu hyvin ääntä säteilevän alumiinirakenteen lisäksi siitä, että hiukkasnopeusanturiin vaikuttaa mitattavan pisteen ympäristön tapahtumat. Värähtelymittaukseen on sen sijaan vaikuttanut vain yhden sylinterikannen pisteen liike.

Värähtely- ja hiukkasnopeustasojen taajuussisällössä ja mittauspisteiden välillä on eroavaisuuksia eli äänen säteily vaihtelee tarkasteltavan taajuuden ja sylinterikannen osa-alueiden mukaan. Sylinterikannen reuna-alueet (pisteet 1 ja 4) saavat erityisen suuria hiukkasnopeuden arvoja terssikaistalla 80 Hz, vaikka värähtelynopeustaso on maltillinen. Tällöin rakenteen säteilykyky on erityisen hyvä näillä taajuuksilla. Sama ilmiö tapahtuu terssikaistalla 250 Hz, jossa arvot tosin ovat pienempiä.

Sylinterikannen keskiosa (piste 3) saa suuria värähtely- ja hiukkasnopeustason arvoja terssikaistalla 630 Hz. Kuten aikaisemmista tuloksista havaittiin, sylinterikannella on ominaistaajuus tällä alueella. Äänen säteily ei ole erityisen voimakasta, koska hiukkasnopeuden tasot pysyvät melko maltillisina.

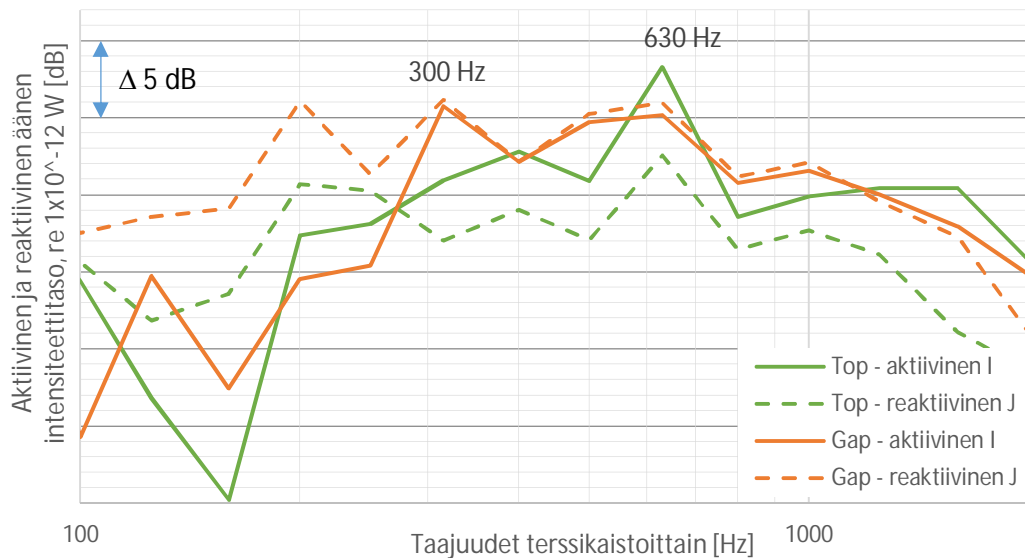
Äänen eteneminen

Äänen etenemistä sylinterikannen pinnalta pois päin tutkittiin moottorin W16V34 DF ajon aikana. Moottorin polttoaineena käytettiin testin aikana kaasua. Sylinterikansi jaettiin neljään eri alueeseen kuvan 34 mukaisesti. S&P-mittaukset tehtiin äänen paikantamismenetelmällä, joten arvot mitattiin hyvin läheltä sylinterikantta. Äänen eteneminen pystytään määrittämään äänikentän reaktiivisuuden avulla (kappale 3.1). S&P-mittalaite mittaa hiukkasnopeuden ja äänenpaineen lähes samasta pisteestä, jolloin äänen aktiivinen intensiteetti I ja reaktiivinen intensiteetti J voidaan selvittää.



Kuva 34. Sylinterikannen eri osa-alueet.

Liitteessä 3 on esitetty alueiden mittaustulokset, joista havaitaan sylinterikansien yläosan (top) ja niiden välisen alueen (gap) tulokset vaikuttavimmiksi. Nämä tulokset on esitetty alla olevassa kuvassa 35. Aktiivinen intensiteetti I tarkoittaa äänen intensiteetin osaa, joka välittyy pois päin havaittavaksi ääneksi, kun taas reaktiivinen intensiteetti J (katkoviiva) viittaa äänikentän sisältämään akustiseen energiaan, joka ei etene pois päin rakenteesta.

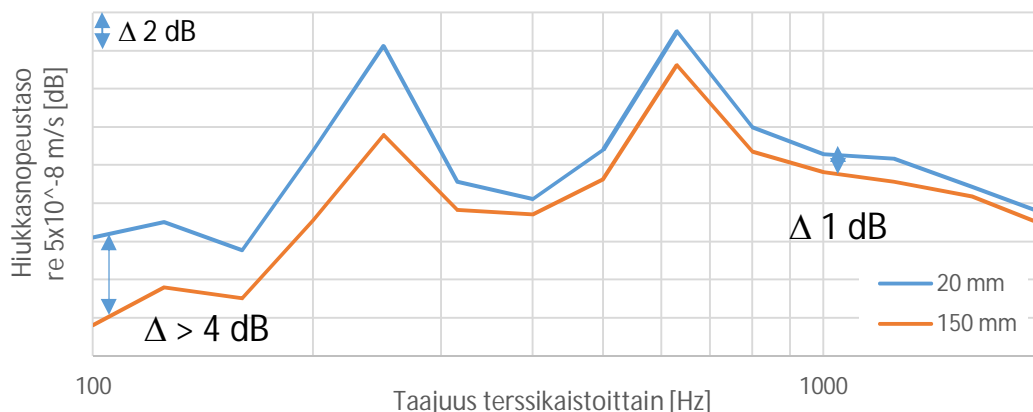


Kuva 35. Sylinterikannen tuottaman äänen aktiivisen ja reaktiivisen intensiteetin arvot.

Taajuuksilla, jotka ovat yli 300 Hz, sylinterikannen yläosan (top) tuottama aktiivinen intensiteetti on voimakkaampi kuin reaktiivinen intensiteetti. Suurimmat arvot tulevat terssikaistalle 630 Hz, jolloin reaktiivinen intensiteetti on melkein 6 dB pienempi kuin aktiivinen. Näin akustinen energia kulkeutuu tehokkaasti sylinterikannen yläosan keskeltä ulospäin.

Intensiteetin arvot sylinterikansien välisellä alueella (gap) ovat myös suhteellisen suuria terssikaistoilla 300 Hz ja 630 Hz. Tällöin reaktiivinen intensiteetti on jopa suurempi kuin aktiivinen. Voidaan sanoa, että sylinterikansien välisen alueen ääni täytyy huomioida suhteellisen voimakkaan aktiivisen intensiteetin takia, mutta toisaalta iso osa sen akustisesta energiasta ei muodostu ääneksi, koska reaktiivinen intensiteettitaso on myös suuri.

Reaktiivisuutta voidaan käyttää äänen etenemisen määrittämiseen. Usein, tässäkin työssä, akustisten suureiden värikarttoja esitetään hiukkasnopeuden arvoilla. Tällöin tarkastelijan täytyy muistaa, että suuri hiukkasnopeustaso ei välttämättä tarkoita suurta melutasoa äänen kaukokentässä. Lähellä pintaa tehtyjen mittausten reaktiivisuus tulisi selvittää tai vastaavasti tehdä mittaus hieman kauempaa. Kuvassa 36 on esitetty hiukkasnopeuden vaimentuminen tarkasteluetaisyyden kasvaessa. Mittauskohteena oli moottorin W8L32 E sylinterikansien 4-6 alue ja mittaus tehtiin S&P-mittalaitteella.



Kuva 36. Hiukkasnopeuden vaimeneminen etäisyyden suhteen.

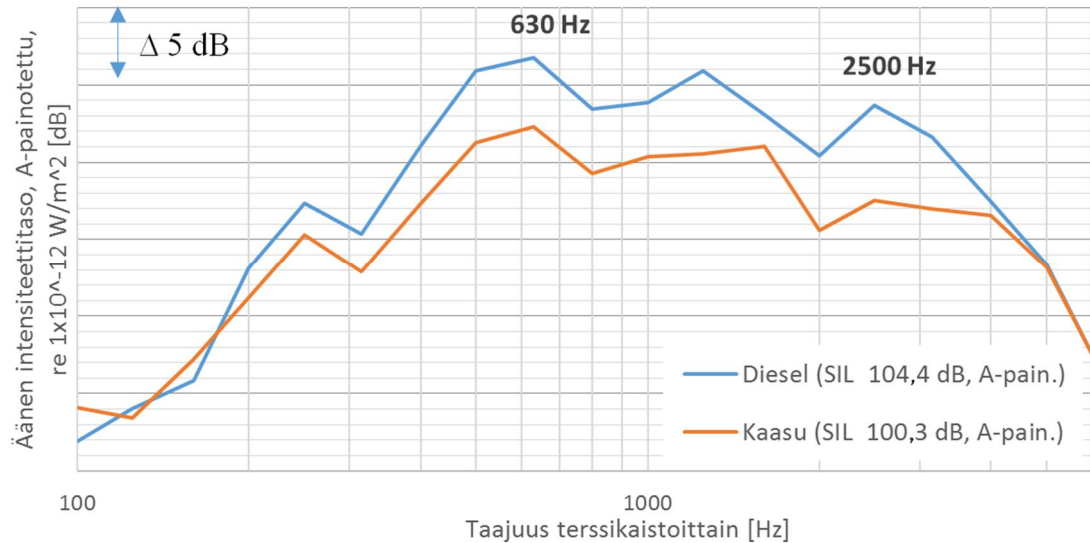
Pienillä taajuuksilla hiukkasnopeustaso on alentunut mittausetäisyyden vaikutuksesta enemmän kuin suurilla taajuuksilla. Terssikaistalla 100 Hz ero on yli 4 dB, kun taas 1000 Hz taajuuskaistalla ero on noin 1 dB. Tämä tukee edellistä tulosta, jonka mukaan reaktiivisuus on voimakasta pienillä taajuuksilla. Moottorimelulle altistuva kuulija on aina äänen kaukokentässä, ja melua koskevat säännöksetkin on tehty vähintään yhden metrin etäisyydelle. Kun ajatellaan moottorin kokonaismelutasoa, suurempien taajuuksien (yli 300 Hz) tarkastelu on tärkeää, koska pienet taajuudet vaimenevat nopeasti.

7.3 Sylinterikansien tuottama melu eri tilanteissa

Moottorin melun muuntumista tutkittiin, kun sen kuormitus, pyörimisnopeus tai käytetty polttoaine muuttui. Tällöin pystytään vaikuttamaan moottorin tuottamiin herätteisiin. Lisäksi tutkittiin sylinterikansien tuottaman melun vaihtelua sen sijaintipaikan mukaan. Sylinterikannen päälle lisätyn suojan vaikutusta meluun tutkittiin ja tulokset on esitetty liitteessä 4. Kun tiedetään, mikä moottorissa on muuttunut, voidaan syventää tietoa moottorin tuottamasta äänestä.

Moottorin käyttämän polttoaineen vaikutus

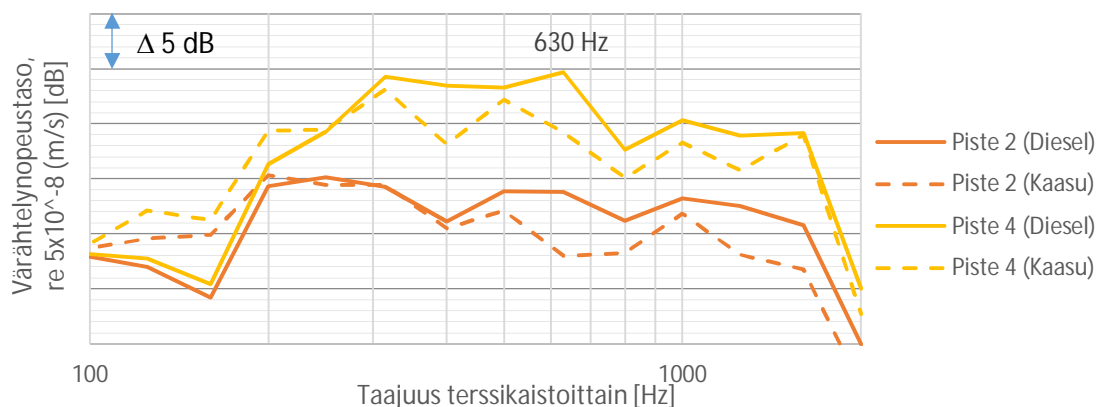
Polttoaineen vaikutusta moottorin värähtelyyn ja sen tuottamaan ääneen oli hyvä tutkia DF-monipolttoainemoottorilla (dual fuel), jossa vain polttoaineen ja siihen liittyvien komponenttien muutokset vaikuttivat lopputulokseen. Moottorin käyttämällä polttoaineella (diesel tai kaasu) ei ole merkittävää vaikutusta moottorin tuottamaan tehoon. Moottorin W8L34 DF sylinterikansien alue mitattiin sekä diesel- että kaasujon aikana S&P-mittalaitteen intensiteettimenetelmällä. Tulokset on esitetty kuvassa 37 terssikaistoittain taajuusvälillä 100 Hz – 6 kHz.



Kuva 37. Moottorin W8L34 DF tuottamat äänen intensiteettitasojen arvot, kun polttoaineena on diesel (sin.) tai kaasu (oranssi).

Kokonaisintensiteettitaso on diesel-ajon aikana noin 4 dB suurempi kuin kaasuajon aikana. Erot muodostuvat laajalla taajuusalueella 500 Hz – 3 kHz. Molempien kuvaajien intensiteettitasojen arvot saavat huippunsa terssikaistalla 630 Hz, jolloin erot tasojen välillä ovat suuret. Erot ovat suurimmillaan (noin 6 dB) taajuuskaistalla 2500 Hz.

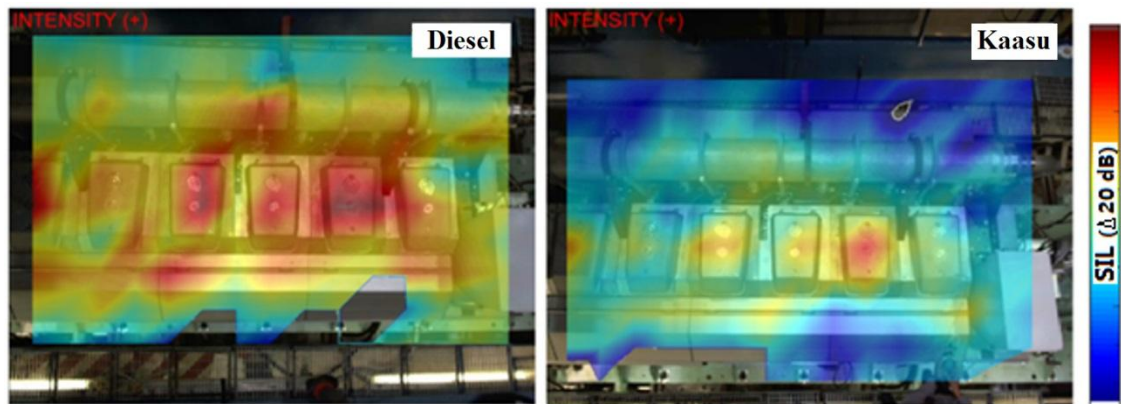
Sylinterikansien värähtelyn tutkiminen voi selventää polttoaineen vaikutusta moottorin tuottamaan meluun. Saman moottorin (W8L34 DF) värähtelynopeustasot on esitetty kuvassa 38, jossa on esitetty sylinterikannen värähtelynopeustaso kahdessa eri pisteessä. Mittaus tehtiin 4. sylinterikannelle ja mittauspisteet (pisteet 2 ja 4) on esitetty aiemmin kuvassa 31.



Kuva 38. Polttoaineen vaikutus sylinterikannen värähtelynopeustasoihin.

Moottorin käyttämä polttoaine vaikuttaa sylinterikansien värähtelynopeustasoihin. Ero on suurimmillaan terssikaistalla 630 Hz, jolloin myös äänen intensiteetti dominoi diesel-ajon aikana. Todetaan, että moottorin tuottama melu terssikaistan arvolla 630 Hz on riippuvainen sylinterikannen värähtelystä ja värähtely on puolestaan peräisin siihen

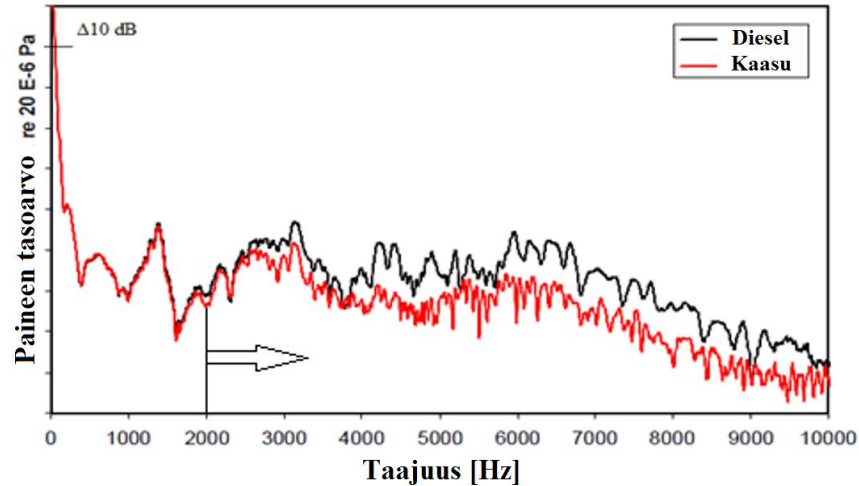
vaikuttavasta herätteestä näillä taajuuksilla. Kuvassa 39 on moottorin W8L34 DF yläosan (sylinterit 1-5) tuottaman äänen intensiteettitason (SIL) värikartta, joka on esitetty terssikaistan taajuudella 630 Hz sekä diesel- ja kaasuajon aikana.



Kuva 39. Moottorin W8L34 DF tuottaman äänen intensiteettitason värikartta terssikaistan taajuudella 630 Hz.

Erityisesti sylinterikansien 2-4 muodostama alue saa suuria äänen intensiteetin arvoja. Suurimpien melutasojen sijainnissa ei ole huomattavaa eroa eri polttoaineajojen välillä. Tämä osoittaa sen, että sylinterikansien melu johtuu pääosin moottorin tuottamista herätteistä, sillä polttoaineen muuttamisella vaikutetaan herätteen suuruuteen. Tällöin melulähde heikentyy, mutta sen sijainti ei muutu.

Äänen intensiteettitasojen arvot vaihtelevat myös suuremmilla taajuuksilla eri polttoaineen käytön seurauksena (kuva 37). Terssikaistan taajuuksilla 2500 Hz ero on suurimmillaan, mutta tämä ei ole selitettävissä sylinterikansien värähtelyllä, sillä sylinterikansien värähtelytasot vaimenevat ennen näitä taajuuksia (kuva 38). Selitys löytyy moottorin sylinteripainekuvaajasta. Wärtsilän aiemmat tutkimukset osoittavat, että diesel-ajon aikana sylinteripaine saa kaasuajoa suurempia arvoja yli 2000 Hz taajuuksilla. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 40, jossa näkyy diesel-ajon sylinteripaineen taajuussisältö (musta) ja kaasuajoa kuvaavat sylinteripaineen arvot (punainen).

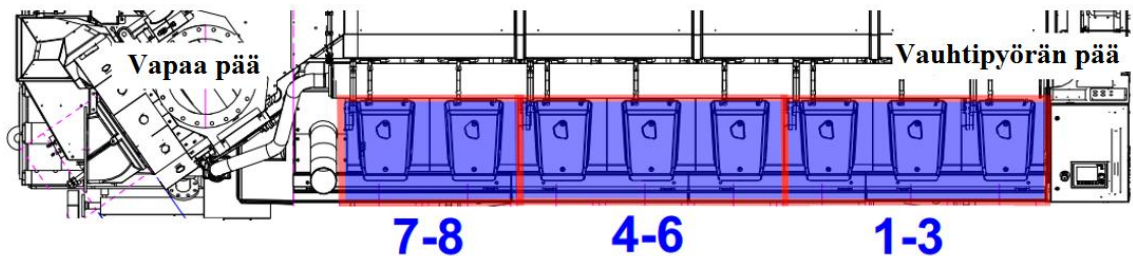


Kuva 40. Sylinteripaineen taajuussisältö, kun polttoaineena on diesel (musta) tai kaasu (punainen). (tulos Wärtsilän aiemmasta tutkimuksesta)

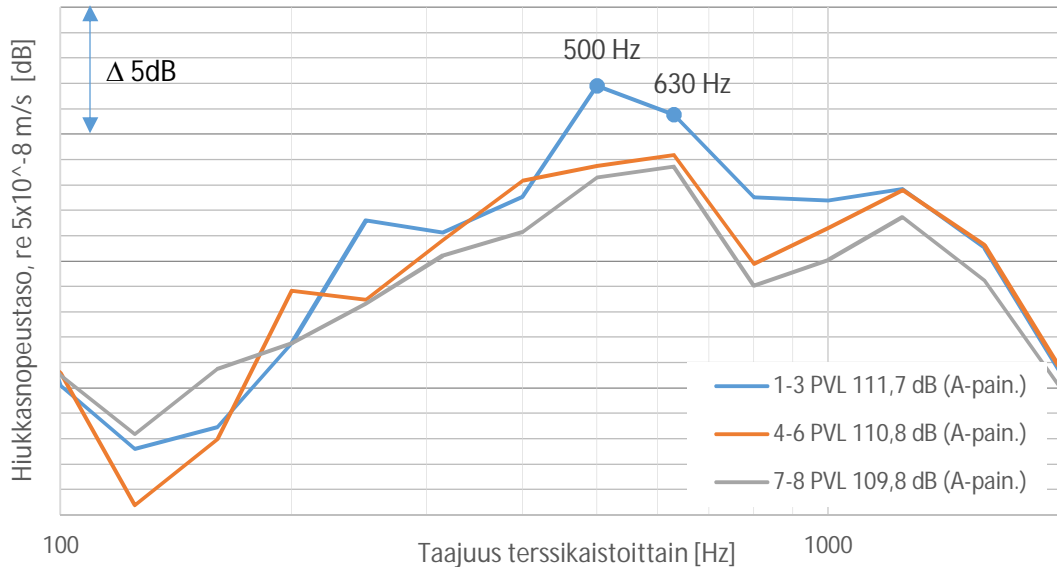
Suuremmilla taajuuksilla polttoaine-eron vaikutus on selkeä. Molempien kuvaajien painearvojen vaihtelu on suurta koko taajuuskaistalla. Tiedetään, että vaihtelu johtuu sylinterin akustisista resonansseista, jotka ovat riippuvaisia lämpötilasta ja paineesta. Näiden suureiden arvo muuttuu, kun käytetään eri polttoaineita. Tästä syystä eri polttoaineiden käyttö vaikuttaa moottorirakenteen saamaan herätteeseen.

Sylinterikansien melun vaihtelu sijaintipaikan mukaan

Sylinterikansien sijainti moottorissa vaikuttaa sen tuottamaan meluun (kuva 39). Melutason vaihtelu vaikeuttaa melua vähentävien keinojen käyttöä, koska ratkaisujen pitäisi olla sopivia kaikissa moottorin paikoissa. Tarkempaa tutkimusta varten moottorin W16V34 DF sylinterikansien tuottamaa melua mitattiin S&P-mittalaitteella äänen paikallistamiseksi. Tutkitut alueet olivat moottorin A-puolen sylinterikannet, jotka jaoteltiin kolmeen osaan (kuva 41). Mittausten tulokset on esitetty kuvassa 42, jossa on eri alueiden hiukkasnopeustasot terssikaistoittain taajuusvälillä 100 Hz – 2 kHz.

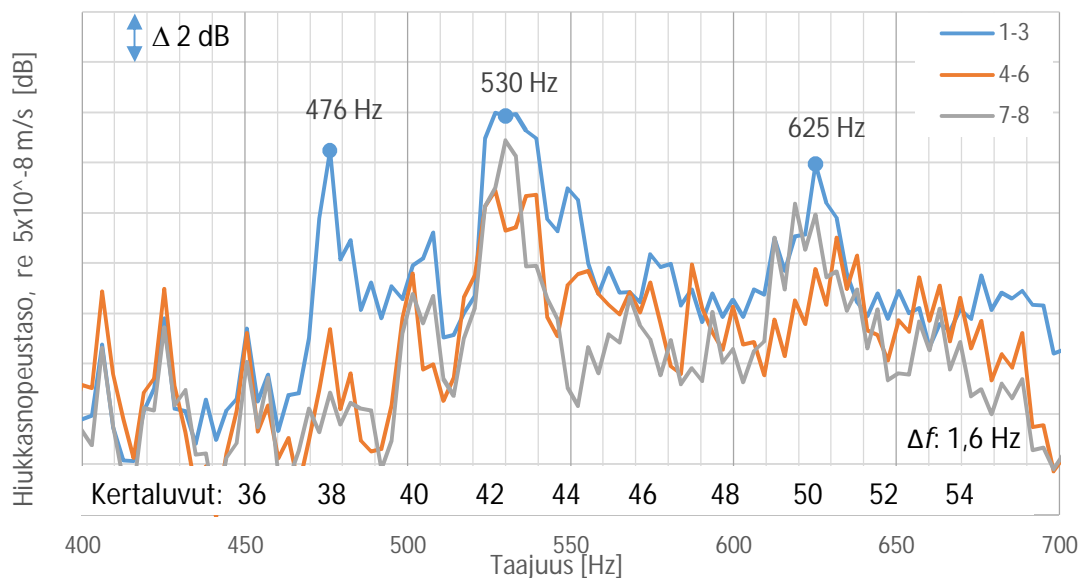


Kuva 41. Mitatut moottorin W16V34 DF sylinterikansien alueet 1-3, 4-6 ja 7-8 (A-puoli).



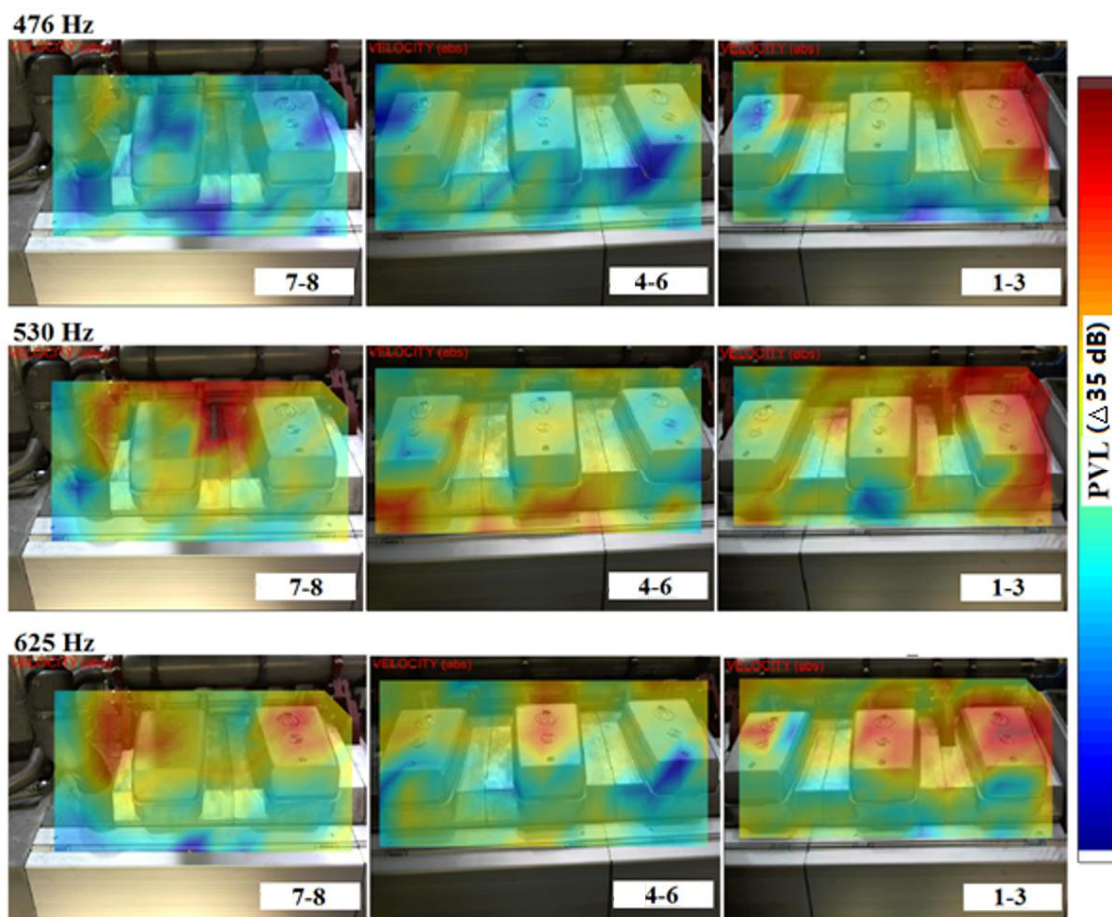
Kuva 42. Moottorin W16V34 DF sylinterikansien hiukkasnopeustasojen arvot.

Hiukkasnopeustasot saavat suuria arvoja terssikaistoilla 500 Hz ja 630 Hz. Tällöin vauhtipyörän pään (1-3) sylinterikannet saavat suuria arvoja näillä taajuuksilla ja ero keskellä olevien (4-6) ja vapaan pään (7-8) sylinterikansiin on noin 3 dB. Eroavaisuuksien selvittämiseksi kuvassa 43 on esitetty kapeakaistainen mittaustulos sylinterikansien tuottamasta melusta taajuusvälille 400 Hz – 700 Hz. Kuvaan on merkitty myös moottorin kertaluvut.



Kuva 43. Sylinterikansien eri alueiden tuottamat hiukkasnopeustasot.

Sylinterikansien tuottamat hiukkasnopeustasot saavat useita suuria arvoja tällä taajuusvälillä. Huomioitavia taajuuksia ovat 476 Hz, 530 Hz ja 635 Hz suurien hiukkasnopeustasojen ja myös sylinterikansien välisen vaihtelun takia. Näitä taajuuksia vastaavat hiukkasnopeuden (PVL) värikartat on esitetty kuvassa 44.



Kuva 44. Moottorin W16V34 sylinterikansien hiukkasnopeustojen värikartat tutkittaville taajuuksille 476 Hz, 530 Hz ja 625 Hz.

Suuri hiukkasnopeustaso taajuudella 476 Hz painottuu ensimmäisten sylinterikansien alueelle. Tämä alue saa vahvan paikallisen herätteen hammasratastosta, joka sijaitsee moottorin vauhtipyörän päässä. Paikallisen herätteen lisäksi taajuudella 476 Hz vaikuttaa myös moottoriheräte. Kuvaa 43 on merkitty moottorin kertaluvut, jossa moottorin 38. kertaluku nostaa kaikkien alueiden hiukkasnopeustasoja. Voidaan sanoa, että hiukkasnopeustason suuri arvo taajuudella 476 Hz johtuu hammasrataston muodostaman paikallisen herätteen ja kaasuvoimien aiheuttaman moottoriherätteen yhteisvaikutuksesta.

Kaikki sylinterikansien alueet tuottavat suuria hiukkasnopeustasoja taajuudella 530 Hz. Kuvasta 43 nähdään, että moottorin kertaluvut 42-44 vaikuttavat tällä alueella. Koska kaikkien sylinterikansien hiukkasnopeustaso on tällä taajuudella suuri, syynä on jokin kokonaisvaltainen heräte tai sylinterikannen ominaistaajuus. Heräte voisi olla peräisin esimerkiksi venttiilikoneistosta.

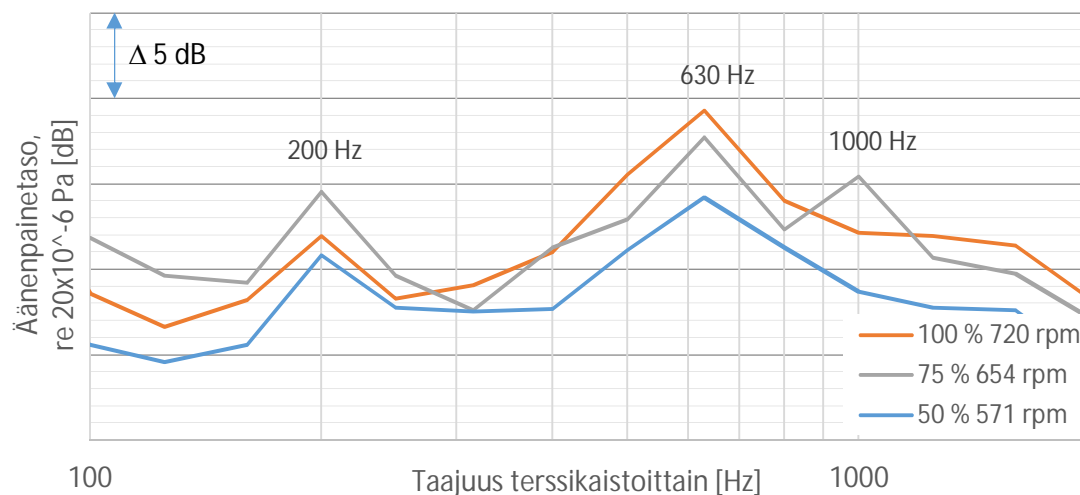
Taajuudella 625 Hz sylinterikansien hiukkasnopeustaso saa myös suuria arvoja, jotka ilmenevät erityisesti sylinterikansien yläosan alueella. Moottoriheräte kertaluvun 50 arvolla vaikuttaa tähän taajuuteen. Aikaisemmista tuloksista huomataan (kuva 30), että

terssikaistan 630 Hz alueella on sylinterikannen ominaistajuus. Moottoriherätteen ja sylinterikannen ominaistajuus aiheuttavat yhdessä suuren hiukkasnopeustason taajuudella 625 Hz.

Moottorin kuormituksen ja kierrosnopeuden vaikutus

Perinteisesti moottorin äänimittaukset tehdään moottorin käydessä täydellä kuormalla ja sen nimellisellä kierrosnopeudella (720 rpm tai 750 rpm). Tässä kappaleessa tutkitaan moottorin kuormituksen ja kierrosnopeuden muutosten vaikutusta. Tällöin pääsemme vaikuttamaan moottorin antamaan herätteeseen, koska esimerkiksi moottorin kertaluku on riippuvainen kierrosnopeudesta.

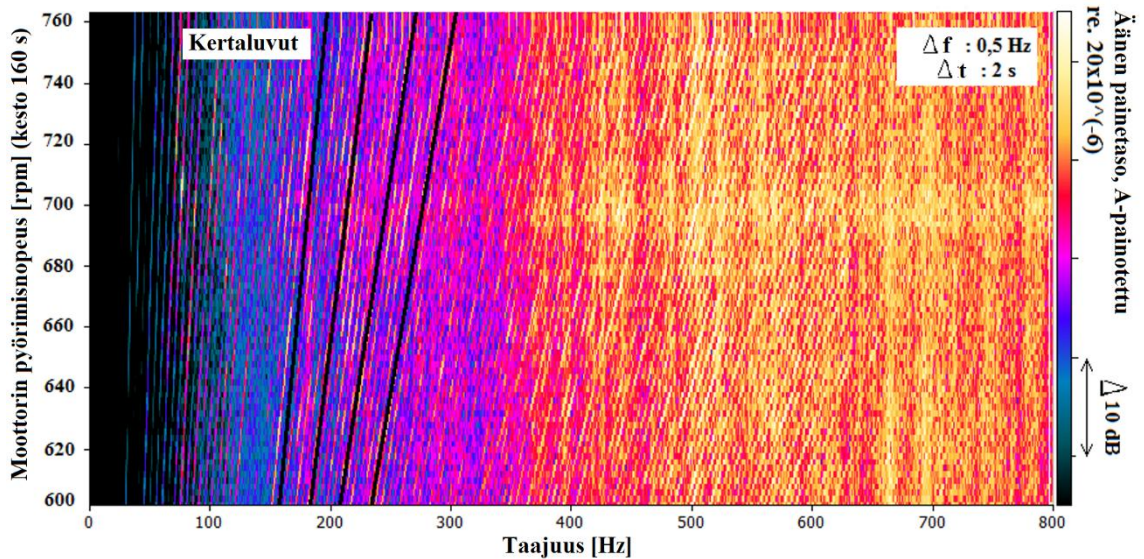
Tutkitaan moottorin W9L32 käyttäytymistä, kun sen kuormitusta ja kierrosnopeutta muutetaan. Näiden kahden muuttujan suhde määritellään niin sanotun potkurikäyrän avulla. Äänenpainemittaukset (1 m etäisyydellä) suoritettiin kolmella eri moottorin kuormalla ja kierrosnopeudella: 100 % kuorma ja 720 rpm, 75 % ja 654 rpm, 50 % ja 571 rpm. Tulokset on esitetty kuvassa 45 terssikaistoittain taajuuksilla 100 Hz - 2 kHz.



Kuva 45. Moottorin W9L32 äänenpainetasojen muutos, kun moottorin teho ja kierrosnopeus vaihtelee potkurikäyrän mukaisesti.

Yleisesti tarkasteltuna moottorin kuorman ja kierrosnopeuden pienentämisen vaikutus näkyy äänenpainetasojen pienentymisenä. Tämä johtuu siitä, että moottorin antamat herätteet heikentyvät, koska muun muassa sylinteripaineet laskevat ja hammasvaihteeseen kohdistuvat voimat pienenevät. Poikkeuksia ovat kuitenkin terssikaistan taajuuksien arvot 200 Hz ja 1000 Hz, jolloin 75 % kuormalla (654 rpm) saadut äänenpainetasojen arvot dominoivat. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseisellä moottorin kierrosnopeudella moottorin antama heräte ja jonkin moottorin komponentin ominaistajuus kohtaavat, jolloin rakenne on resonanssissa. Resonanssissa värähtely on voimakkaimmillaan, joka vaikuttaa siten myös tuotettuun ääneen.

Toinen tarkastelu tehtiin moottorille W6L32 ja tällöin vain moottorin kierrosnopeutta muutettiin. Nopeutta kasvatettiin yhdellä kierroksella sekunnissa, jolloin mittaus kierrosnopeudesta 600 rpm nopeuteen 760 rpm kesti 160 sekuntia. Äänenpainemittauksen aikana moottorin kuorma oli 50 %. Kuvassa 46 on äänenpainetaso esitettyinä taajuuden (0 Hz – 800 Hz) funktiona, kun moottorin kierrosnopeus (aika 0 s – 160 s) muuttuu. Äänenpainetason arvot ovat A-painotettuja.



Kuva 46. Kierrosnopeuden vaikutus moottorin yläosan tuottamaan äänenpainetasoon.

Äänenpainetasojen taajuusarvot eivät muutu merkittävästi moottorin kierrosnopeuden muuttuessa. Taajuuksilla 400 Hz – 700 Hz moottorin tuottama äänenpainetaso saa koko mittauksen suurimmat arvot. Kierrosnopeuden 700 rpm arvolla äänenpainetaso kasvaa hetkellisesti. Tämä on jonkin moottoriosan resonanssi-tila ja tällöin moottorin käyttäminen tällä kierrosnopeudella voi aiheuttaa ongelmia moottorin tuottaman melun kanssa.

Kuvaan 46 on korostettu neljä moottorin kertalukua. Tässä tutkimuksessa moottoreiden kertalukujen vaikutus on nähtävissä 650 Hz asti. Kertalukujen muodostamat viivat ovat kapeita ja epäjatkuvia, joten voidaan sanoa, että suurilla taajuuksilla moottoriherätteiden vaikutus ei ole suuri. Koska heräte on kuitenkin olemassa, sen yhdistyminen jonkin rakenteen ominaistaajuuden tai paikallisen herätteen kanssa voi saada aikaan suuren värähtelytason. Ominaistaajuudet näkyvät yllä olevassa kuvassa pystysuorina viivoina, koska ominaistaajuuden taajuusarvo ei muutu, vaikka heräte muuttuisi. Esimerkiksi taajuuksilla 510 Hz ja 680 Hz ilmenee jonkin rakenteen ominaistaajuus. Usein tämän alueen taajuudet ovatkin ongelmallisia, kun tarkastellaan moottorimelua.

8. VÄHÄMELUINEN RATKAISU

Tämän työn tavoitteena oli kehittää konkreettinen ratkaisu, jolla moottorin meluavimman alueen melutasoa saisi laskettua. Ratkaisun suunnittelussa käytettiin hyväksi työn aikana saatuja mittaustuloksia, jotka on esitetty edellisessä kappaleessa. Tarvittava lisäinformaatio saatiin kirjallisuudesta. Moottorin käyttöympäristö asettaa ratkaisulle rajoitteita: laivan konehuoneeseen ei toivota ylimääräisiä suojia, koska ne hankaloittavat moottorin huoltoa ja vievät tilaa. Rakenteen pitää myös kestää kuumuutta ja estää öljyn tai muiden kemikaalien vuodot.

8.1 Suunnittelu

Lähtötilanteen arvioinnin tuloksena havaittiin, että moottorin sylinterikannet aiheuttavat valtaosan moottorin tuottamasta äänestä. Sylinterikansien värähtely johtuu niihin vaikuttavien herätteiden yhdistymisestä ja värähtelytilannetta pahentavat sylinterikansien ominaistuuksudet. Lisäksi värähtely muuntuu hyvin ääneksi alumiinisen rakenteen ansiosta. Rakenteen kyky säteillä ääntä on hyvä, koska se on kevyt ja jäykkä. Näiden tietojen perusteella vähämeluinen ratkaisu voidaan saavuttaa seuraavien muutosten avulla:

- Sylinterikansien värähtelyä pienennetään valitsemalla vaimentavia materiaaleja.
- Rakenteen kykyä säteillä ääntä rajoitetaan.
- Käyttöympäristö huomioidaan ratkaisua suunniteltaessa.

Sylinterikansien tuottaman melun vähentämiseksi ja vähämeluisen ratkaisun saavuttamiseksi sylinterikansien materiaalia muutettiin. Muita melunhallinnan vaihtoehtoja olivat sylinterikannen eristäminen moottorirakenteesta tai ylimääräisen suojan lisääminen sylinterikannen päälle. Nämä vaihtoehdot olisivat kuitenkin kohdanneet ongelmia öljyvuotojen muodossa ja konehuoneen tilankäytön kanssa.

Kirjallisuuden perusteella komposiittimateriaali, jonka lujitteena on lasi- tai hiilikuitu, täyttää vähämeluiselle rakenteelle annetut vaatimukset. Komposiittimateriaalin pääajatus on yhdistää kahden materiaalin hyvät puolet, joista yleensä toinen toimii lujitteena ja toinen sidosaineena. Perustietoa komposiiteista löytyy lähteestä [22]. Komposiittien ominaisuudet soveltuvat hyvin koneenrakennukseen, sillä ne ovat (tarpeen mukaan) kevyitä ja lujia sekä kestävät lämpöä ja erilaisia kemikaaleja. [23] Lisäksi komposiitilla on kyky vaimentaa värähtelyä [24]. Materiaalilla on myös mahdollista vähentää rakenteen kykyä säteillä ääntä, koska komposiitin painoa ja

jäykkyyttä voidaan muokata materiaalivalinnoilla sekä valmistusteknisillä ominaisuuksilla (lujitteen ja sidosaineen suhde, lujitekuitujen suunnat).

Komposiittien kyky vaimentaa värähtelyä johtuu sidosaineen viskoelastisesta käyttäytymisestä sekä lujitteen ja sidosaineen rajapinnassa tapahtuvista energiahäviöistä. Värähtelyenergia muuntuu tällöin pääosin lämmöksi. Sidosaaineen materiaali vaikuttaa enemmän vaimennukseen kuin lujitteen materiaali. Komposiitin käyttölämpötilalla on myös vaikutusta. [24]

Äänen säteily on riippuvainen värähtelevän rakenteen massasta ja jäykkyydestä (kappale 3.1). Säteily vähenee kriittistä taajuutta kasvattamalla, mikä onnistuu lisäämällä rakenteen pintamassaa tai vähentämällä taivutusjäykkyyttä. Komposiittimateriaalilla voidaan vaikuttaa näihin tekijöihin. Taulukossa 7 on esitetty tiheyden ja kimmokertoimien arvoja alumiinille sekä komposiittimateriaaleille, joissa on käytetty lujitteena lasi- ja hiilikuitua. Materiaalien arvot ovat suuntaa antavia ja pätevät komposiiteille, jotka ovat käsin laminoituja ja joiden kuitutiheys on 50 %.

Taulukko 7. Alumiinin ja komposiittimateriaalien ominaisuuksia

	Tiheys [g/cm³]	Kimmokerroin [GPa]
Alumiini	2,7	70
Lasikuitu	2,0 – 2,7	15
Hiilikuitu	1,55 – 2,0	45

Materiaalien jäykkyyden arvoissa on huomattavia eroja. Lasikuidun kimmokerroin on lähes viidesosan alumiinin kimmokertoimesta, jolloin voidaan olettaa, että lasikuituisen rakenteen äänen säteilykyky on pienempi. Materiaalien tiheys ei muutu radikaalisti. Äänen säteilyn kannalta pintamassaltaan painavampi rakenne on parempi, joten tässä työssä tavoitteena ei ollut tehdä mahdollisimman kevyttä rakennetta.

8.2 Testitulokset ja niiden tarkastelu

Tämän työn aikana testattiin useita erilaisia komposiittimateriaaleja ja -rakenteita. Koska komposiitti on anisotrooppinen materiaali (eli sen ominaisuudet ovat eri suunnista erilaiset) melun mallintaminen on monimutkaisille rakenteille haastavaa. Mittauksilla saatiin nopeasti luotettavaa tietoa komposiittien vaikutuksesta värähtelyyn ja meluun.

Ensimmäiseksi mitattiin eri komposiittimateriaalien värähtelyn vaimennusominaisuuksia yksinkertaisten levyjen (250 mm x 300 mm x 15 mm) avulla. Näiden testitulosten perusteella valittiin materiaali sylinterikansien prototyyppiin.

Prototyypeille tehtiin mittauksia kahdella eri moottorilla, jolloin mitattiin äänen intensiteettiä, äänenpainetta ja värähtelyä.

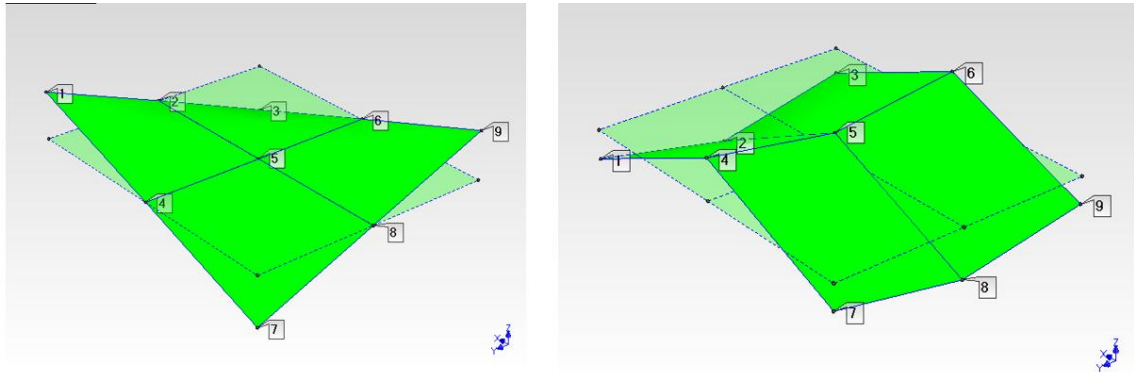
Komposiittimateriaalin vaimennusominaisuudet

Komposiittilevyille suoritettiin iskuvasaratesti, joka avulla saatiin selville levyjen ominaistajuudet ja -muodot sekä värähtelyn vaimennusominaisuudet. Mitatut materiaalit olivat lasi- ja hiilikuitulujitteiset komposiitit, joiden sidosaineena käytettiin epoksia tai vinyyliesteriä. Kerrosrakenteen, hiilikuitu-vahto-hiilikuitu, vaikutusta vaimennukseen tutkittiin myös (levyjen paksuudet poikkesivat hieman toisistaan). Teräslevyn tulokset toimivat suuntaa antavina vertailuarvoina. On huomioitava, että teräslevyn dimensiot erosivat komposiittilevyistä.

Testitulokset on esitetty taulukossa 8, johon on kirjattu kunkin levyn kaksi ensimmäistä ominaistajuutta ja niitä vastaavat ominaismuodot ja vaimennuskertoimet. Jokaisella levyllä ensimmäiset ominaismuodot olivat levyn pitkittäissuunnan vääntö ja taivutus, jotka on esitetty kuvassa 47. Kerrosrakenteelle saatiin luotettavia tuloksia vain ensimmäisellä ominaistajuudella.

Taulukko 8. Komposiittimateriaalista valmistettujen levyjen ominaistajuudet, -muodot ja vaimennuskertoimien arvot

	Ominaistajuus [Hz]	Ominaismuoto	Vaimennuskertoin (%)
Hiilikuitu + vinyyliesteri 250x300x15	609	1. vääntö	0,32
	851	1. taivutus	0,65
Hiilikuitu + epoksi 250x300x15	606	1. vääntö	0,23
	860	1. taivutus	0,49
Lasikuitu + vinyyliesteri 250x300x15	459	1. vääntö	0,32
	565	1. taivutus	0,75
Lasikuitu + epoksi 250x300x15	461	1. vääntö	0,46
	564	1. taivutus	0,91
Kerrosrakenne (vahto, hiilikuitu + epoksi) 250x250x12	260	1. vääntö	1,32
Teräs 200x300x20	1080	1. vääntö	0,16
	1180	1. taivutus	0,18



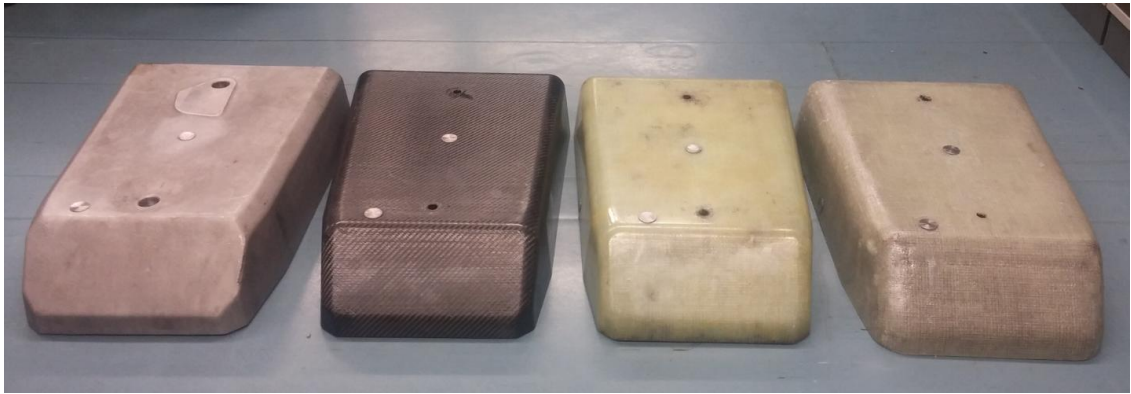
Kuva 47. Testilevyjen ensimmäiset ominaismuodot: vääntö (vasen) ja taivutus (oikea).

Molemmat hiilikuitulujitteiset komposiitit saavat suurempia ominaistajuuden arvoja kuin lasikuituiset. Kerrosrakenteen ominaistajuudet ovat vertailun pienimpiä ja teräslevyn selkeästi vertailun suurimpia. Komposiitin jäykkyys määrittyy sen lujitteen ominaisuuksien mukaan ja jäykkyys puolestaan määrittelee pääosin kappaleen ominaistajuuden.

Materiaalien vaimennusominaisuudet vaihtelevat eri materiaalien välillä. Kerrosrakenteen vaimennuskerroin on testin suurin ja teräslevyn pienin. Komposiittimateriaalien välisessä vertailussa lasikuiturakenne, jonka sidosaineena on epoksi, tuottaa suurimman vaimennuskertoimen. Hiilikuitulevy vaimentaa värähtelyä parhaiten, kun sidosaineena on vinyyliesteri.

Komposiitista valmistetut sylinterikansien prototyypit

Sylinterikansien prototyyppeihin valittiin materiaali edellä esitetyn värähtelytestin perusteella. Prototyypin muoto säilytettiin lähes samana kuin alkuperäinen alumiininen sylinterikansi. Tällöin voidaan parhaiten vertailla materiaalin vaikutusta tuotettuun meluun ja lisäksi varmistetaan, että sylinterikansi sopii paikalleen sekä minimoidaan öljyvuotojen riski. Testatut prototyypit on esitelty kuvassa 48 ja niiden ominaisuudet on lueteltu taulukossa 9. Alkuperäiset alumiinikannet on vahvistettu sisäpuolelta rivoilla, joten komposiittisista prototyypeistä tehtiin hieman paksumpia kuin alkuperäisistä. Jokaista prototyyppiä valmistettiin kolme kappaletta.



Kuva 48. Testatut sylinterikannet vasemmalta: perinteinen alumiininen (vas.), hiilikuituinen, lasikuituinen ja kerrosrakenne.

Taulukko 9. Sylinterikansien materiaalit, paksuus ja massa

	Sidosaine	Materiaalipaksuus	Paino
Alumiini	-	8 mm	7,6 kg
Hiilikuitu	Vinyyliesteri	10 mm	5,0 kg
Lasikuitu	Epoksi	10 mm	6,4 kg
Kerrosrakenne (lasikuitu)	Epoksi	3+3 mm (shells) 5 mm (rubber) = 11 mm	7,1 kg

Hiilikuituiset sylinterikannet ovat testin kevyimpiä, mutta erot painossa ovat maltilliset. Kuvassa 48 esitetyt sylinterikannet korvasivat alkuperäisen alumiinisen kannen ja niitä kutsuttiin testissä ”ylemmiksi suojiksi”. Kuvassa 49 on esitetty testissä käytetyt ”alemmat suojat”, jotka asetettiin alkuperäisten alumiiniosien päälle niin, että ne peittivät sylinterikansien välisen ja edessä olevan alueen.



Kuva 49. Kuvassa vasemmalla vain ylempi sylinterikannen osa asennettuna ja kuvassa oikealla on alempi osa asetettu alumiinisen alueen päälle.

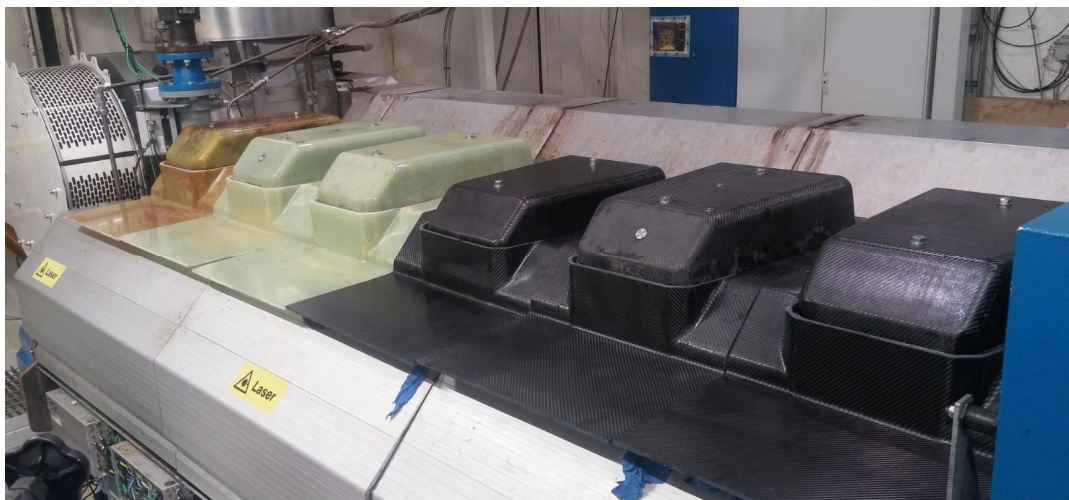
Tämän työn prototyypitesteissä molemmat suojat olivat paikoillaan. Näin alumiinisen rakenteen vaikutus testiin saatiin minimoitua. Alemman suojan ja alumiinirakenteen välissä oli 5 mm kumiliuskoja kovan kontaktin välttämiseksi.

Prototyyppien vaikutus meluun

Ensimmäinen mittaus suoritettiin moottorilla W6L32. Koska sylinterin tuottama melu on riippuvainen sylinterin paikasta moottorissa, kaikki eri materiaalit mitattiin samassa paikassa. Kuvassa 50 on esitetty testiasetelma vertailuarvoja varten ja kuvassa 51 hiilikuituiset prototyypit ovat sylinterikansien paikoilla 1-3 ja lasikuituiset paikoilla 4-6. Yksi lasikuituinen prototyyppi on hieman tummentunut lämmönkestävyystestin seurauksena.

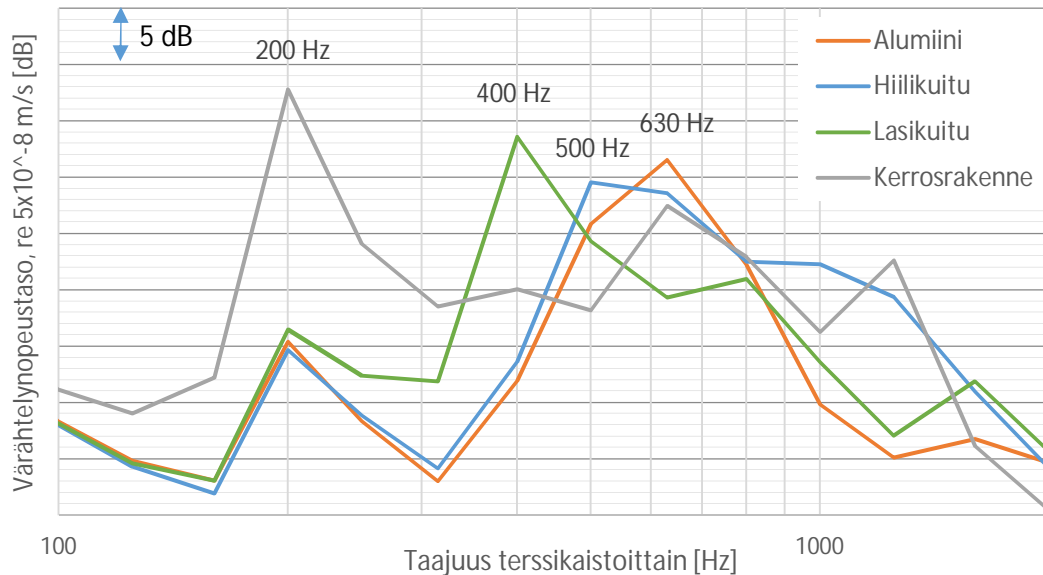


Kuva 50. Perinteiset alumiiniset sylinterikanset asennettuna moottoriin W6L32.



Kuva 51. Hiilikuituiset (1-3) ja lasikuituiset (4-6) sylinterikanset asennettuna.

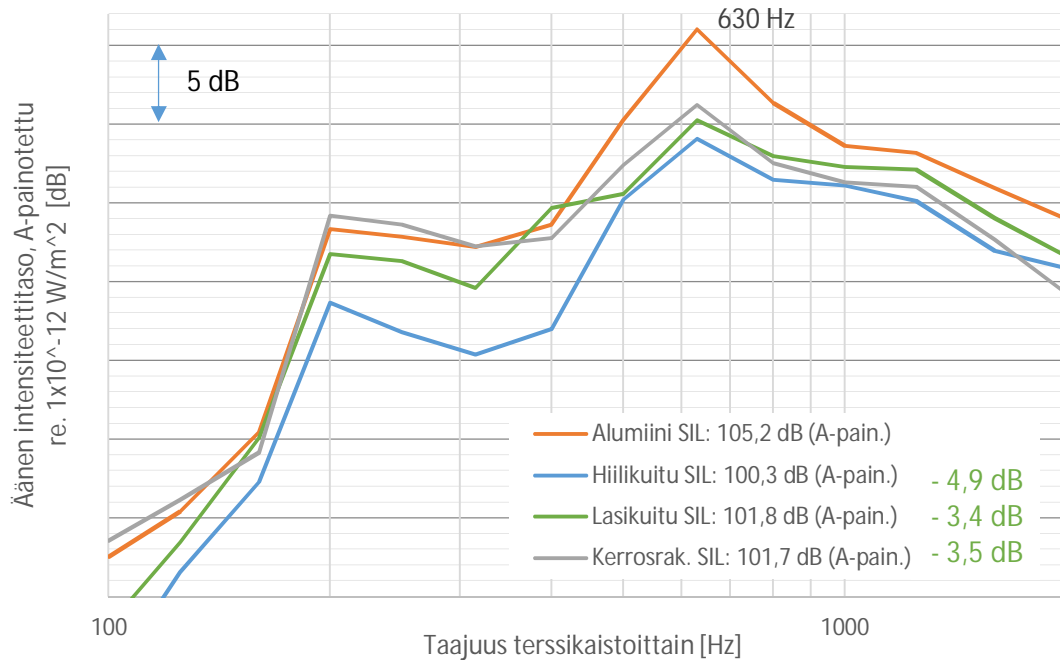
Kuvassa 52 esitetyt tulokset on saatu sylinterikansien 4-6 alueella suoritetuista värähtelyn ja äänen mittauksista. Sylinterikansien värähtely mitattiin viidennen kannen keskeltä. Värähtelynopeustason arvot on esitetty terssikaistoittain taajuusvälille 100 Hz – 2 kHz.



Kuva 52. Komposiittisuojiin värähtelynopeustaso sylinterikannen yläosan keskipisteessä.

Alumiinisen sylinterikannen tuottaman värähtelynopeustason huippu on taajuuskaistalla 630 Hz. Tämä taajuuskaista tiedetään dominoivaksi, kun tarkastellaan koko moottorin melua. Hiilikuidun ja kerrosrakenteen arvot tällä taajuuskaistalla ovat jonkin verran pienempiä ja lasikuituprototyypin arvot huomattavasti pienempiä kuin alumiinisen sylinterikannen. Arvojen pienentyminen johtuu komposiittien suuremmasta materiaalivaimennuksesta ja myös rakenteiden ominaistajuuden muutoksista. Hiilikuituprototyypin tuottama värähtely saa huippunsa taajuuskaistalla 500 Hz ja lasikuidun vastaava taajuuskaista on 400 Hz. Koska sylinterikannet mitattiin samassa paikassa, niiden saama heräte on sama ja huippuarvon muutos johtuu rakenteen ominaistajuuden pienentymisestä. Ominaisaajuus laskee, koska rakenteen jäykkyys pienenee materiaalivaihdoksen myötä. Kerrosrakenteen värähtelynopeustaso on suurimmillaan terssikaistan taajuudella 200 Hz ja rakenteen useat värähtelytason piikit johtuvat sen eri materiaalikerrosten ominaistajuuksista.

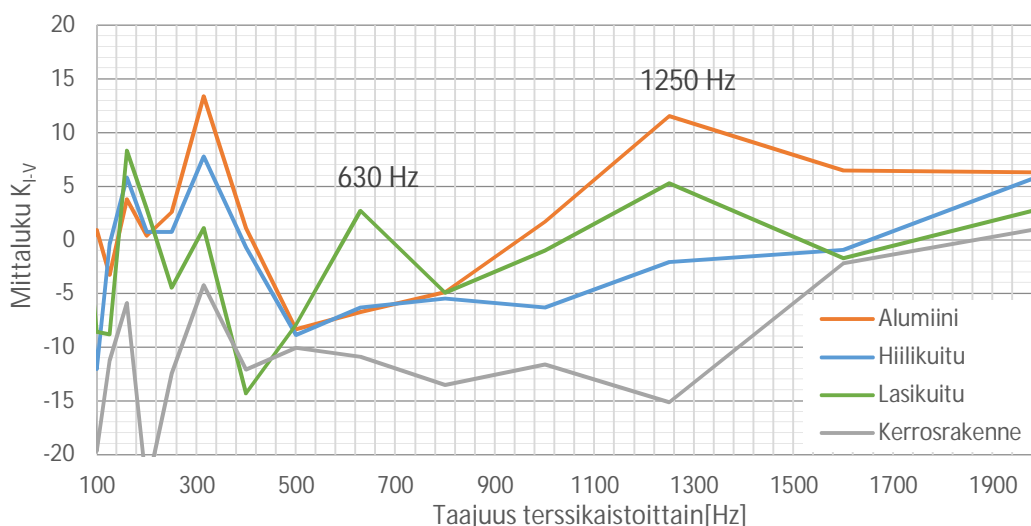
Sylinterikansien 4-6 alueelta mitattiin äänen intensiteetti kaikille testikappaleille. Intensiteettitason tulokset ovat esitetty terssikaistoittain taajuusvälillä 100 Hz – 2 kHz. Terssikaistojen arvot ovat A-painotettuja, jotta materiaalimuutoksen todellinen vaikutus moottorin tuottamaan meluun voidaan havaita. Kuvaan 53 on merkitty kokonaisintensiteettitason (SIL) arvot kaikille testatuille materiaaleille.



Kuva 53. Testattujen sylinterikansien äänen intensiteettitasot.

Komposiittisten sylinterikansien kokonaisintensiteettitaso on kaikilla komposiittimateriaaleilla noin 3 dB – 5 dB pienempi kuin perinteisellä alumiinisella sylinterikannella. Ero saavutetaan, koska lähes kaikilla taajuuksilla komposiittien arvot ovat pienempiä ja erityisesti taajuuskaistan 630 Hz arvoja saadaan vähennettyä vähintään 5 dB. Voidaan sanoa, että alumiinisen sylinterikannen korvaaminen komposiittisella kannella vaikuttaa laskevasti melutasoon lähes kaikilla taajuuksilla ja toimii tehokkaasti ongelmallisilla taajuuksilla.

Hiilikuituisten sylinterikansien tuottama äänen intensiteettitaso on pienin lähes kaikilla taajuuskaistoilla. Hiilikuitu ei kuitenkaan ollut vähiten värähtelevä rakenne (kuva 52), joten voidaan ajatella, että testirakenteiden äänen säteilyssä on eroja. Mittaluku K_{I-V} laskettiin kaikille testikappaleille ja tulokset on esitetty kuvassa 54. Molemmat mittaukset suoritettiin viidennen sylinterikopan keskelle ja laskettu erotus on ilmoitettu terssikaistoittain taajuuksilla 100 Hz – 2 kHz (huomaa lineaarinen taajuus-akseli).



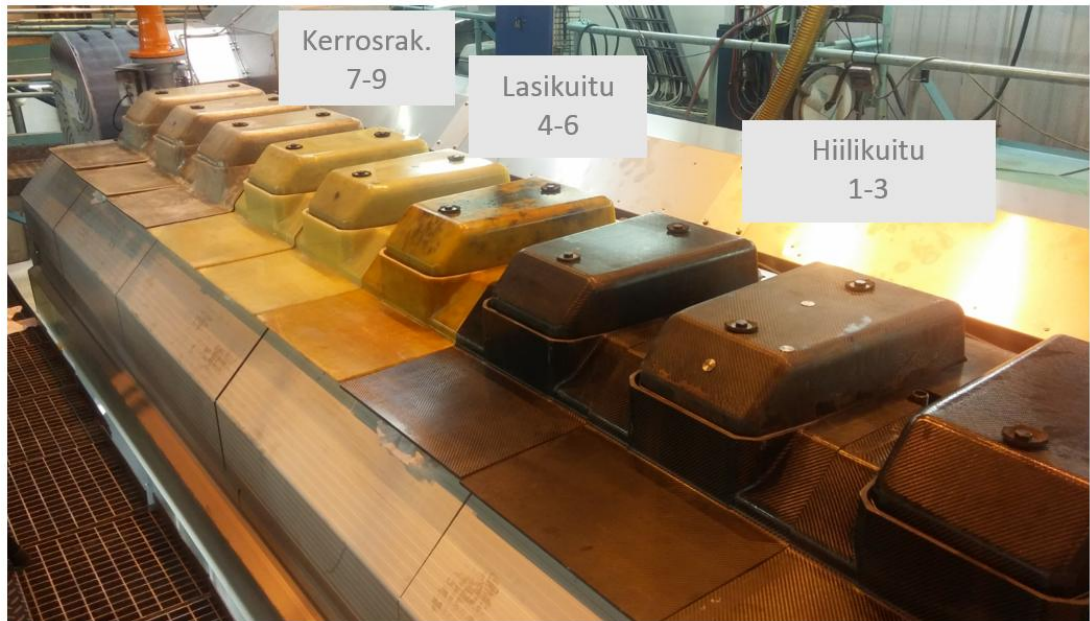
Kuva 54. Materiaalin vaikutus tuotettuun ääneen.

Alumiinisen sylinterikannen $K_{I,v}$ -arvot hallitsevat lähes kaikilla taajuuskaistoilla. Suurimmat erot tapahtuvat taajuuskaistalla 1250 Hz, jolloin alumiinin ja kerrosrakenteen arvojen ero on 25 dB. Kerrosrakenteen arvot ovat pieniä, koska sen ominaistajuus tällä taajuusalueella (kuva 52) tuottaa suuren värähtelytason, mutta se ei johda suureen äänen intensiteettitasoon (kuva 53).

Melutasojen kannalta 630 Hz taajuuskaista on tärkeä. Tutkittujen rakenteiden $K_{I,v}$ -arvot ovat pääosin pieniä tällä taajuusalueella, mutta lasikuituisen rakenteen arvo on selvästi suurempi kuin muut. Lasikuidulla rakenteen värähtelytaso oli pieni tällä taajuusalueella, mutta äänen intensiteettitaso puolestaan suuri. Lasikuituisen rakenteen äänen säteilykykyä voidaan sanoa suhteellisen hyväksi 630 Hz terssikaistalla.

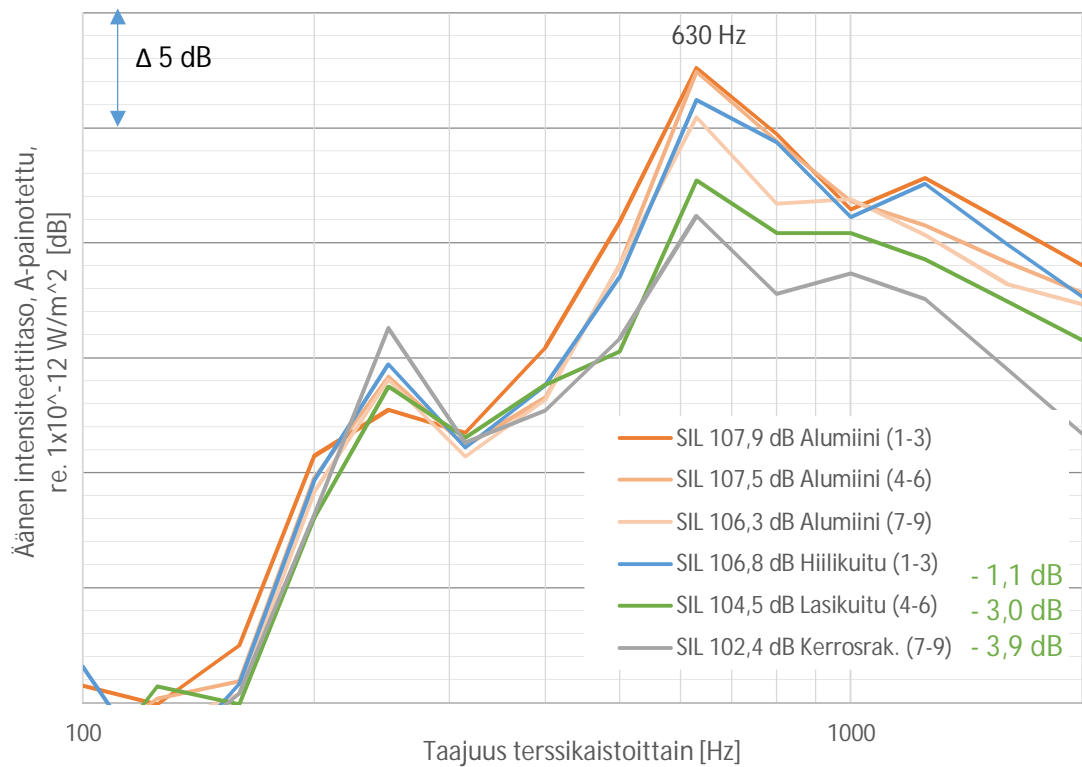
Vertailemalla lasikuidun ja kerrosrakenteen arvoja, voidaan tarkastella, millainen vaikutus rakenteen kriittisen taajuuden kasvamisella on. Kerrosrakenteen kriittinen taajuus on suurempi, koska rakenteen pintamassa on kasvanut ja jäykkyys on pienentynyt verrattuna täysin lasikuituiseen rakenteeseen. Jäykkyyden voidaan olettaa pienentyneen, koska välimateriaali on pehmeää kumia ja vain 3 mm kerrosrakenteen pinnat eivät ole kontaktissa keskenään. Kriittisen taajuuden muutoksen vaikutus voidaan nähdä kerrosrakenteen mittaluvun $K_{I,v}$ pieninä arvoina.

Komposiittiprototyyppiä mitattiin myös moottorin W9L32 kanssa. Sylinterikannet olivat asennettuina moottoriin seuraavasti: hiilikuitu alueella 1-3, lasikuitu alueella 4-6 ja kerrosrakente alueella 7-9 (kuva 55). Kun vertaillaan kunkin alueen arvoa alumiinisten sylinterikansien tuottamaan arvoon, saadaan vertailukelpoista tietoa eri komposiittimateriaalien tuottamasta melusta.

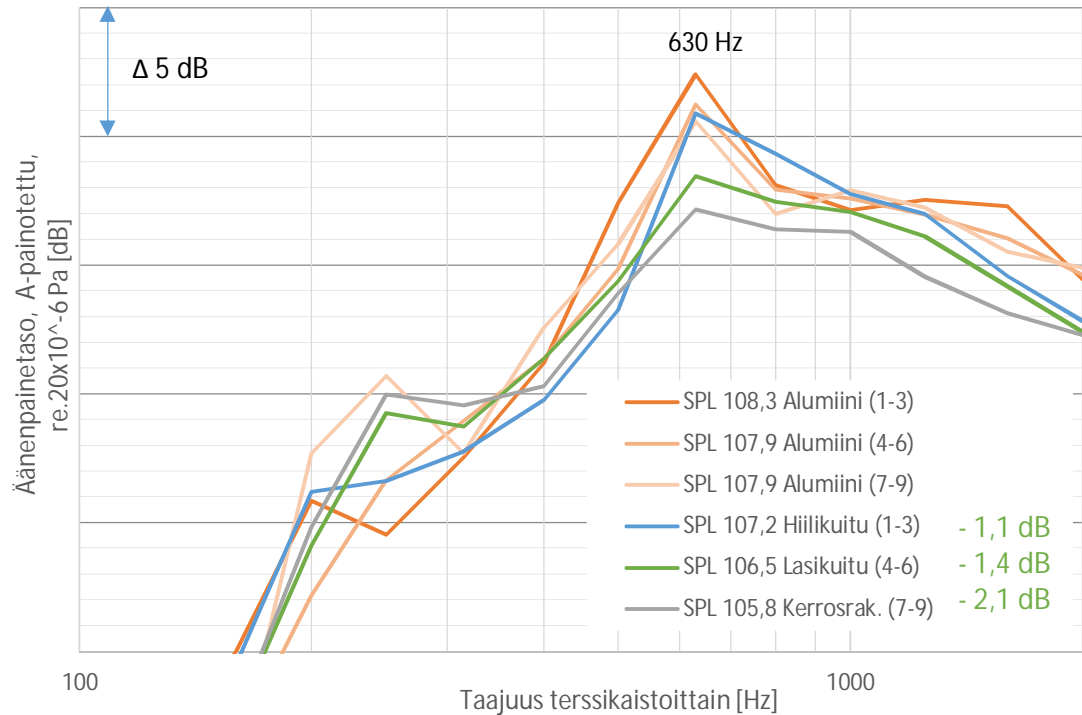


Kuva 55. Komposiittiprototyypin testijärjestelyt (moottori W9L32).

Äänen intensiteetti ja äänenpaine mitattiin kaikilta alueilta komposiittimateriaalin vaikutuksen arvioimiseksi. Saadut tulokset on esitetty kuvissa 56 ja 57, jotka on esitetty terssikaistoilla 100 Hz - 2 kHz. Kokonaistasojen arvot (SIL, SPL) ovat merkitty myös kuvaan ja lisäksi on laskettu jokaisen alueen alumiiniosan ja komposiittiosan melutason erotus.



Kuva 56. Moottorin W9L32 komposiittitestin äänen intensiteettitasot mittausalueittain.



Kuva 57. Moottorin W9L32 komposiittitestin äänenpainetasot mittausalueittain.

Moottorin kokonaismelutasot laskevat komposiittimateriaalin avulla, ja erityisesti ongelmallisten taajuuksien arvot pienentyvät. Kuviin on laskettu melutasojen muutokset, kun verrataan alumiinisen ja komposiittisen sylinterikansien tuottamaa melua samalta alueelta. Tässä testissä kerrosrakenne vähensi tehokkaimmin melua vähentäen sylinterikansien alueen 7-9 intensiteettitasoa 3,9 dB ja äänenpainetasoa 2,1 dB. Kerrosrakenne pystyi parhaiten rajoittamaan taajuuskaistan 630 Hz arvoja, jotka ovat yleisestikin moottorin eniten melua aiheuttavat taajuudet.

9. TULOSTEN ARVIOINTI

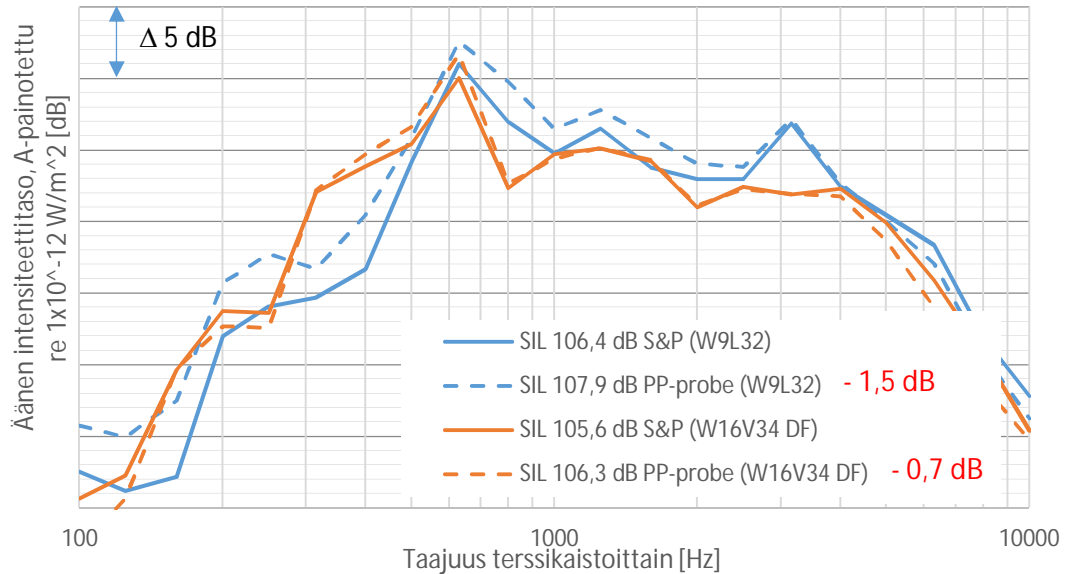
Tässä kappaleessa arvioidaan Scan & Paint -mittalaitteen luotettavuutta ja komposiittitestitulosten toistettavuutta. Työn aikana tulleita ajatuksia ja kokemuksia on myös jaettu, koska aiheet ovat varsin uusia ja tuntemattomia ja niistä on vaikea löytää käytännön kokemuksia.

Scan & Paint -mittalaitteen luotettavuus

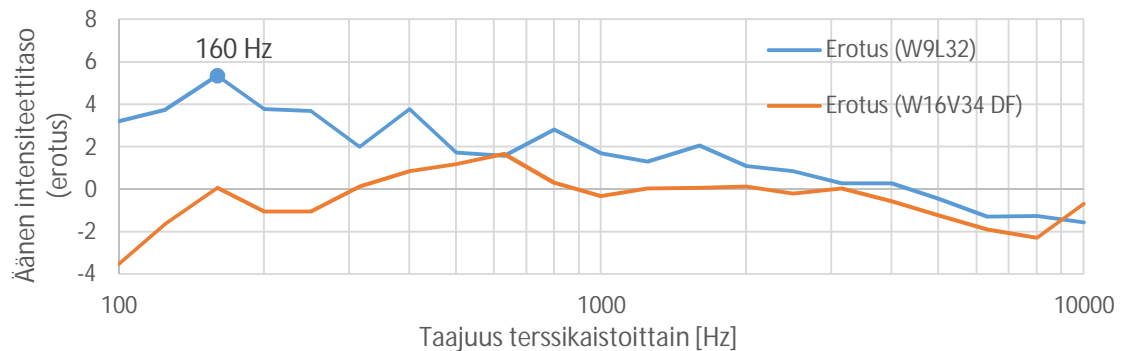
Akustisen hiukkasnopeuden mittaaminen ja siihen pohjautuva kaupallinen Scan & Paint -sovellus mahdollistaa entistä tehokkaammat työvälitteet moottorimelun paikantamiseen ja analysointiin. Tulokset voidaan esittää havainnollisesti värikarttojen avulla, koska sovelluksen avulla pystytään paikantamaan suuret määrät mittausdataa. Melulähteiden kartoitus voidaan tehdä yleensä muutamassa minuutissa, mutta kysymys kuuluu ovatko tulokset luotettavia?

Scan & Paint -laite mittaa hiukkasnopeuden ja äänenpaineen lähes samasta pisteestä ja tämä anturiyhdistelmä on laitteessa saatu todella kompaktiksi. Äänenpaineen mittaaminen ja mikrofonien kalibrointi on tunnettu jo kauan. Scan & Paint -laite on ensimmäinen kaupallinen sovellus, joka mittaa hiukkasnopeutta, joten anturin antamat tulokset jäävät ilman vertailuarvoja. Laitteen kalibrointi on kuitenkin mahdollista [25], mutta kalibrointia ei pysty tekemään itse, vaan laite on lähetettävä valmistajalle.

Luotettavuutta voidaan arvioida, kun vertaillaan S&P-mittalaitteella saatuja äänen intensiteetin tuloksia perinteisellä kahden mikrofonin yhdistelmällä (PP-probe) saatuihin tuloksiin. PP-probe:n menetelmä on standardoitu ja vakiintunut vuoden 1977 ensimmäisen kaupallisen version jälkeen [26], joten sen tuloksia voidaan pitää luotettavina. Alla olevassa kuvassa 58 on esitetty kahden moottorin (W9L32 ja W16V34 DF) äänen intensiteettitulokset, jotka mitattiin molemmilla mittalaitteilla. PP-proben tulokset on merkitty katkoviivalla. Kuvassa 59 on laskettu tulosten erotus taajuuskaistoittain molemmille moottoreille.



Kuva 58. Scan & Paint ja PP-probe mittalaitteiden äänen intensiteettitasojen tulokset.



Kuva 59. Mittalaitteiden antamien tulosten välinen ero taajuuskaistoittain.

Äänen kokonaisintensiteettitason (SIL) arvot eroavat toisistaan 1,5 dB ja 0,7 dB, ja molempia moottoreita mitatessa S&P-mittalaitteella saadut tulokset ovat pienemmät. Suurimmat erot muodostuvat pienillä taajuuksilla, joissa taajuuskaistan 160 Hz arvolla moottorin W9L32 mittauksessa ero ovat jopa 5 dB. Moottorin W16V34 mittauksessa erot ovat huomattavasti pienempiä. Mittausten väliset erot voivat johtua monesta syystä, joiden selvittäminen vaatisi syvempää tarkastelua. Intensiteetin arvo S&P-mittalaitteella on saatu mittaamalla hiukkasnopeus ja äänenpaine. Moottori tuottaa suhteellisen suuren melutason, joten molempien antureiden todellinen kyky mitata tässä ympäristössä tulisi selvittää. PP-probe mittaa kahdella mikrofonilla ja hiukkasnopeus lasketaan näiden signaalien vaiheen avulla. Mikrofonit pystyvät mittaamaan luotettavasti suuriakin melutasoja, mutta hiukkasnopeuden laskemisessa oletetaan, että mittaus tapahtuu äänen kaukokentässä eli saapuva ääniaalto on tasoaalto. Toisin sanoen, PP-proben tulos vääristyy, jos mittaus tehdään äänen lähikentässä. Mittausetäisyys on 200 mm ja testihuone mahdollistaa äänen heijastukset, joten kaukokenttäoletus voi olla virheellinen.

Insinööriyöhön S&P-laitteen mittatarkkuus todetaan riittäväksi, koska äänen intensiteettitasojen arvot ovat riittävän lähellä (alle 2 dB) referenssimittalaitteen antamia tuloksia. Vertailtavuus kuitenkin kärsii tuloksilla, jotka on tehty eri melulähteille eri mittalaitteilla. Esimerkiksi mitatun melun pienten taajuuksien vertailu voi sisältää suuriakin virheitä. Itse mittauksen ja äänen paikallistamisen tarkkuus on kiinni mittauksen tekijän huolellisuudesta: mittausetäisyyden täytyy säilyä samana ja anturin suunnan on pysyttävä kohtisuorassa pintaa vasten.

Kokemuksia Scan & Paint -mittalaitteen käytöstä

Alle on listattu huomioita ja kokemuksia S&P-mittalaitteen käytöstä suuren keskinopeuksisen moottorin tuottaman melun tutkimisessa. Kommentit koskevat mittauslaitetta ”Scan & Paint – PU regular” ja ohjelmistoa ”Microflown Velo 3.A”.

- Järjestelmän kokoaminen ja perusidean hahmottaminen on käyttäjälle yksinkertaista. Tarkoin tulee kuitenkin huolehtia siitä, että ohjelmistolla on oikea informaatio käytetyistä mittalaitteista (esimerkiksi antureiden kalibrointitiedot).
- Suuret mittauskohteet vaativat järjestelmältä jatkojohdot mittausanturille ja kameralle. Lisäksi kamera täytyy sijoittaa tarpeeksi kauas mitattavasta kohteesta, missä auttaa kameran siirreltävä teleskooppinen jalusta.
- Anturille menevän johdon liike vaikuttaa jonkin verran mittaussignaaliin, mutta ilmiön todellista vaikutusta lopputulokseen ei ole tutkittu.
- Mittausohjelmiston käytettävyys ei ole kaikissa suhteissa kovin hyvä. Käyttäjä joutuu tottumaan erikoispiirteisiin, kuten kaksoistallennukseen ja mittausdatan paikallistamisen ongelmiin. Virheet eivät kuitenkaan vaikuta lopputulokseen tai tuloksen luotettavuuteen.
- Ohjelmisto on suhteellisen uusi, minkä käyttäjä havaitsee ajoittain sen käytettävyydessä. Valmistaja kehittää ohjelmistoa kuitenkin koko ajan ja heidän IT-tukensa on auttanut nopeasti ongelmatilanteissa.

Ominaispiirteistään huolimatta S&P-järjestelmän käytön oppii nopeasti. Laitteen potentiaali on nopeissa mittaustuloksissa ja tulosten visuaalisessa esittämisessä. Valmistajalla on järjestelmästä myös 3D-versio, jonka käyttöä on kokeiltu suurten keskinopeuksisten moottoreiden muodostamassa mittaussympäristössä. Kolmiulotteisen mittauksen ansiosta mittauksen havainnollistaminen paranee entisestään ja tulokset pystytään paikallistamaan tarkemmin mittauskohteeseen.

Komposiitin käyttö moottoriosan materiaalina

Tässä työssä tutkitut komposiittitilevyt ja -prototyypit valmistettiin injektio menetelmällä. Prototyyppiä varten valmistettiin avomuotti sylinterikannen mallin perusteella ja tiivistura koneistettiin, jotta sylinterikansi sopisi paikoilleen eikä vuotaisi öljyä. Komposiittimateriaaleja lämpötestattiin ja havaittiin että ne kestävät vähintään 120 °C lämpötilan. Komposiittiset sylinterikannet ovat käsityötä, joten niiden lujuusominaisuudet voivat vaihdella kuitujen suunnan ja käyttölämpötilan mukaan. Näistä syistä kahta täysin samanlaisilla ominaisuuksilla olevaa sylinterikantta ei käsin voi valmistaa. Prototyyppiä valmistettiin jokaisesta materiaalista kolme ja niitä testattiin kahdella eri moottorilla. Näihin tosiasioihin perustuen, komposiittitestin otanta on vielä hyvin pieni, joten testitulokset voidaan ajatella suuntaa antaviksi.

Mahdollisia virheitä prototyyppien testituloksiin tuovat käyttölämpötilan vaihtelut ja sylinterikansien pulttien kiristysmomentit. Esimerkiksi W6L32 moottorilla tehdyt komposiittitestit suoritettiin kahtena eri päivänä. Ensimmäisenä päivänä mitattiin hiili- ja lasikuituprototyypit ja toisena päivänä mitattiin vain kerrosrakente. Tällöin komposiittien lämpötilat ovat voineet olla erisuuruiset, riippuen siitä kuinka pitkään moottoria on ajettu ennen testiä. Sylinterikansien pultit kiristettiin käsin, joten kiristysmomentit sylinterikansien välillä ovat vaihdelleet moottorilla W6L32 tehdyn testin tapauksessa. Kiristyksellä on vaikutusta sylinterikannen käyttäytymiseen. Moottorin W9L32 testeissä pultit kiristettiin momenttiavaimella, joten kiristysmomentit olivat samat. Tässä testissä yksi virhelähde on moottorin antama heräte, joka ei ole sama kaikille sylinterikansille. Tämän takia vertailu materiaalien välillä on hankalaa. Testien jälkeen havaittiin myös, että lasikuituiset prototyypit olivat imeneet öljyä rakenteensa sisälle. Tämä on todennäköisesti ongelma vain käsintehdyissä komposiittirakenteissa, mutta tämäkin asia täytyy ottaa huomioon tulevaisuuden kehitystyössä.

Komposiittimateriaalit mahdollistavat tehokkaan melua vähentävän ratkaisun kehittämisen niiden rakenteiden ja materiaalien optimoinnin ansiosta. Komposiittirakenteisiin voidaan sisällyttää melua ja tärinää vähentäviä kerroksia, ja käytettävissä olevien materiaalien kirjo on valtava. Vaimennusominaisuuksien parantamiseksi käytettyä sidosainetta voidaan mukauttaa sen käyttölämpötilan mukaan, ja lujuusominaisuuksia voidaan vaihdella materiaalin eri suunnissa. Nykypäivänä komposiittirakenteiden valmistus on kehittynyt ja niiden sarjatuotanto laskee hinnat kilpailukykyisiksi tehden materiaalista yhä helpommin saavutettavaa.

10. YHTEENVETO

Moottoreiden kehittyessä entistä tehokkaammiksi myös niiden tuottama melu kasvaa, jos äänen vähentämiseksi ei kehitetä ratkaisuja. Moottorimelua koskevat säädökset ovat kiristyneet, mikä yhdessä moottoreiden melutasojen kasvun kanssa pakottaa kehittämään meluratkaisuja moottorimelun vähentämiseksi. Nykyinen SOLAS-vaatimus on, että laivan konehuoneen melutaso ei saa ylittää 110 dB (A-painotettu äänenpainetaso yhden metrin päässä moottorista) missään sen yksittäisessä pisteessä. Tässä työssä keskityttiin moottorin yläosan tuottaman melun tutkimiseen. Tällä hetkellä yläosan melu on hallitseva moottorin kokonaismelun kannalta, koska muiden alueiden tuottamaa ääntä on onnistuneesti vähennetty.

Tämä työ oli kokeellisesti painottunut, sillä se koostui kymmenelle moottorille suoritetuista melu- ja värähtelymittauksista. Perinteisten mittausmenetelmien lisäksi työssä otettiin käyttöön uusi mittalaite. Scan & Paint on ensimmäinen kaupallinen laite akustisen hiukkasnopeuden mittaamiseksi; työssä arvioitiin sen mittausluotettavuus ja käytettävyys.

Venttiilikopat ovat tällä hetkellä moottorin meluavin yksittäinen alue. Niiden tuottama ääni on voimakkainta taajuuksilla 500 Hz – 800 Hz. Näiden taajuuksien korostuminen on monen yksittäisen asian summa: moottoriherätteet, venttiilikoppien ominaistaajuudet sekä äänen säteily ja eteneminen aikaansaavat edellä mainitun taajuusalueen painottumisen. Moottoriherätteet ovat suurin syy venttiilikoppien värähtelyn muodostumiselle. Värähtelyä korostavat myös venttiilikoppien ominaistaajuudet. Rakenteen voimakas värähtely ei aina tarkoita sitä, että rakenne tuottaisi paljon ääntä. Alumiinisten venttiilikoppien tapauksessa äänen säteily on kuitenkin tehokasta, koska materiaalin ansiosta niiden rakenne on hyvin kevyt ja jäykkä. Äänen etenemistä rakenteen pinnalta äänen kaukokenttään on tutkittu käyttäen reaktiivisen äänikentän tunnettuja ominaisuuksia hyödyksi. Suurimman melutason taajuuksilla varsinkin venttiilikopan yläosan tuottama ääni siirtyy tehokkaasti rakenteesta pois päin.

Materiaalivalinnoilla voidaan vähentää moottorin tuottamaa melua. Tässä työssä tutkittiin komposiittisten venttiilikoppien vaikutusta moottorin kokonaisääneen. Testeissä saavutettiin 2 dB äänenpainetason (1 m, A-painotettu) lasku, käyttämällä komposiittista valmistettuja venttiilikoppia. Kirjallisuuden ja työssä tehtyjen mittausten avulla suunniteltiin venttiilikopat, joiden ääntä vähentävä vaikutus perustuu värähtelyn vaimentamiseen ja äänen säteilyn rajoittamiseen. Värähtelyn vaimentuminen komposiittirakenteessa johtuu materiaalin viskoelastisesta käyttäytymisestä sekä lujitteen ja sidosaineen aiheuttamista epäjatkuvuuskohdista. Äänen säteilyn hallinta perustuu komposiittirakenteen verrattain alhaiseen taiputusjäykkyyteen.

Viimeisen vuosikymmenen aikana pitkäkestoisella ja systemaattisesti toteutetulla työllä moottorin melutasoa on pystytty vähentämään noin 5 dB. Tämän tutkimuksen tuottamien tulosten avulla moottorit voidaan toteuttaa vielä 2 dB hiljaisemmaksi. Suuren keskinopeuksisen moottorin melutaso voidaan saada alle 105 dB optimoimalla tässä työssä esitettyä vähämeluista ratkaisua.

LÄHTEET

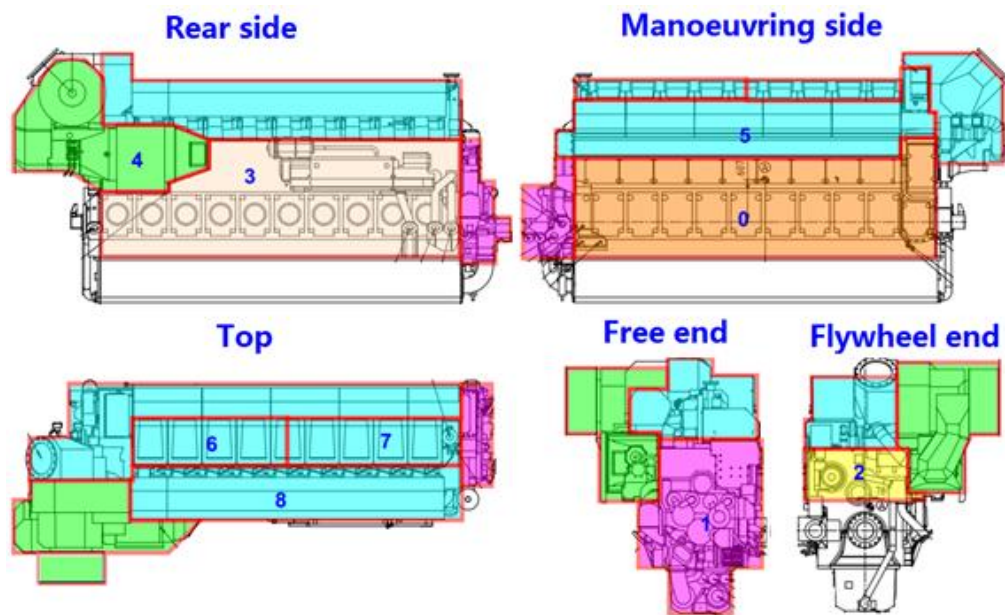
- [1] F. Fahy, P. Gardonio, Sound and structural vibration; Radiation, Transmission and Response, 2007, 633 p.
- [2] M. P. Norton, D. G. Karczub, Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. Cambridge University Press, 2003, 631 p.
- [3] H.-E. de Bree, The Microflown E-book, 2007, Saatavissa: <http://www.microflown.com/library/books/the-microflown-e-book.htm>
- [4] Z. Gao, K. Saine, S. Oksanen, SOLAS new noise regulation impact on engine noise reduction and engine room. 2016.
- [5] Product leaflet - Scan & Paint (Microflown Technologies), 8 p.
- [6] IMO, Adoption of the Code on Noise Levels on Board Ships, MSC 91/22/Add.1 Annex 1, vol. 337, 2012, 36 p
- [7] F. A. Everest, K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, Sixth Edit. 2015.
- [8] ISO, ISO/TR 25417:2007 Acoustics -- Definitions of basic quantities and terms.
- [9] M. J. Crocker, Handbook of Noise and Vibration Control. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] P. Maijala, Akustiikan mittaukset, esivedos 20.9.2012, 164 p.
- [11] D. A. Bies, C. H. Hansen, Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition, vol. 8. 2009.
- [12] L. Cremer, M. Heckl, B. A. T. Petersson, Structure-Borne Sound. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [13] F. Jacobsen, P. M. Juhl, Fundamentals Of General Linear Acoustics. 2013.
- [14] T. D. Rossing, Springer Handbook of Acoustics, Book, no. JANUARY 2007, 2007, 1182 p.
- [15] D. J. Inman, Engineering vibrations. 1994.
- [16] W. T. Thomson, Theory of Vibration with Applications. 1981.
- [17] T. L. Schmitz, K. S. Smith, Mechanical Vibrations, Modeling and Measurement. 2012.
- [18] S. Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, A Wavelet Tour Signal Process,

1999, pp. 20–41,

- [19] P. Avitabile, *Experimental Modal Analysis: A Simple Non-Mathematical Presentation*, *Sound Vib.*, 2001, pp. 1–11.
- [20] E. . Richards, Chapter 22 - Noise from industrial machines, in *Noise and vibration*, 1982, p. 866.
- [21] ISO, ISO 10816-6:1995 Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW.
- [22] F. C. Campbell, *Introduction to Composite Materials*, *Struct. Compos. Mater.*, 2010, pp. 1–29,.
- [23] K. K. Chawla, *Composite Materials*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [24] B. S. Ben, B. a Ben, K. Adarsh, K. a Vikram, and C. Ratnam, Damping measurement in composite materials using combined finite element and frequency response method, 2011, pp. 89–97.
- [25] T. G. H. Basten and H.-E. de Bree, “Full bandwidth calibration procedure for acoustic probes containing a pressure and particle velocity sensor.,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, no. 1, 2010, pp. 264–70.
- [26] N. Tandon, “Sound intensity technique and its applications in noise control,” 1998.

Äänen intensiteettimittaus moottorille W9L32 E

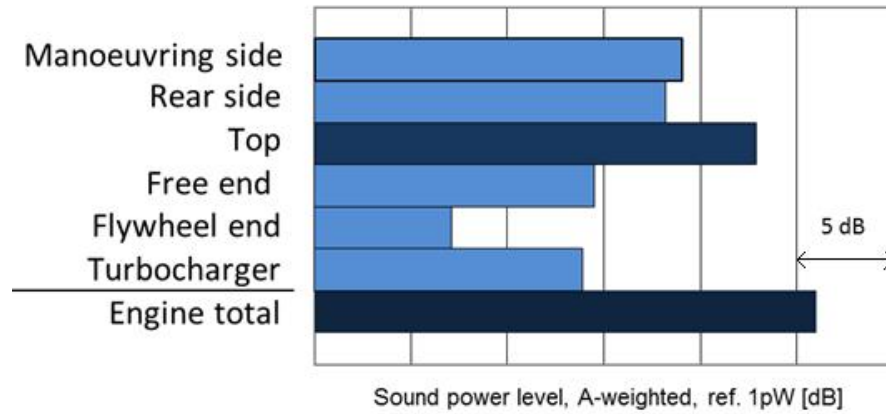
Äänen intensiteettimittauksilla katettiin koko moottorin pinta-ala. Moottorin kuorma oli tällöin 100 % ja sen kierrosnopeus oli 750 rpm. Mittaus tehtiin PP-probe:lla kuvan L1.1 mukaisille alueille. Mittaustulokset on esitetty kuvassa L1.2, jossa äänitehotason tulokset on esitetty moottorialueittain. Äänitehon arvot laskettiin kunkin alueen keskimääräisen intensiteetin ja alueen pinta-alan avulla.



Kuva L1.1. Wärtsilän mittaustavan mukaiset moottorialueet.

Taulukko L1.1. Moottorialueet

Oranssi	A-puoli (käyttö)	Manoeuvring side
V. oranssi	B-puoli (huolto)	Rear side
Vihreä	Turboahdin	Turbocharger
Sininen	Yläosa	Top
V. punainen	Vapaapää	Free end



Kuva L1.2. Moottorin W9L23 E intensiteettitasot alueittain.

Moottorin yläosan äänitehotaso on vähintään 4 dB suurempi kuin muilla moottorialueilla, jolloin se on suurin tekijä moottorin kokonaismelutasoon. Kyseessä oleva moottori ei ole varusteltu moottorin sivuille kehitetyillä suojilla, jotka vähentävät niiden alueiden melua. Tämän vuoksi A- ja B-puolet saavat suhteellisen suuria arvoja testissä. Todellisuudessa vauhtipyörän pään ääniteho olisi hieman suurempi, mutta tässä testissä ei saatu hyvää otantaa tältä alueelta (katso kuva L1.1).

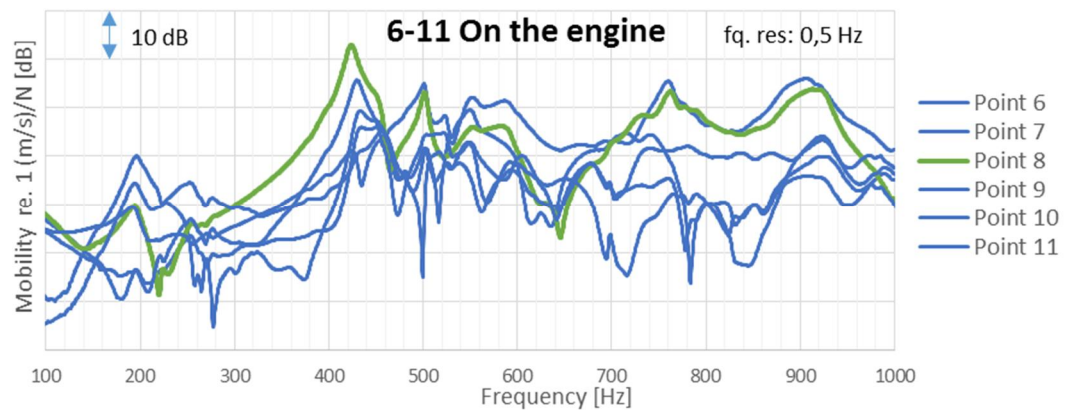
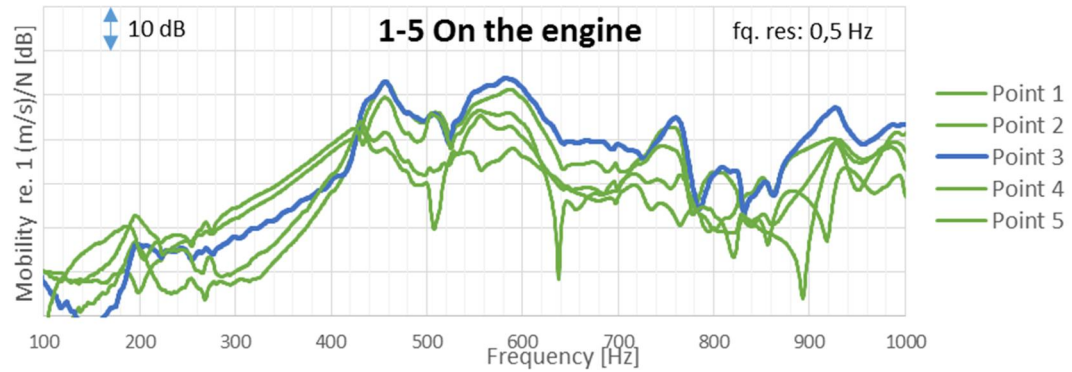
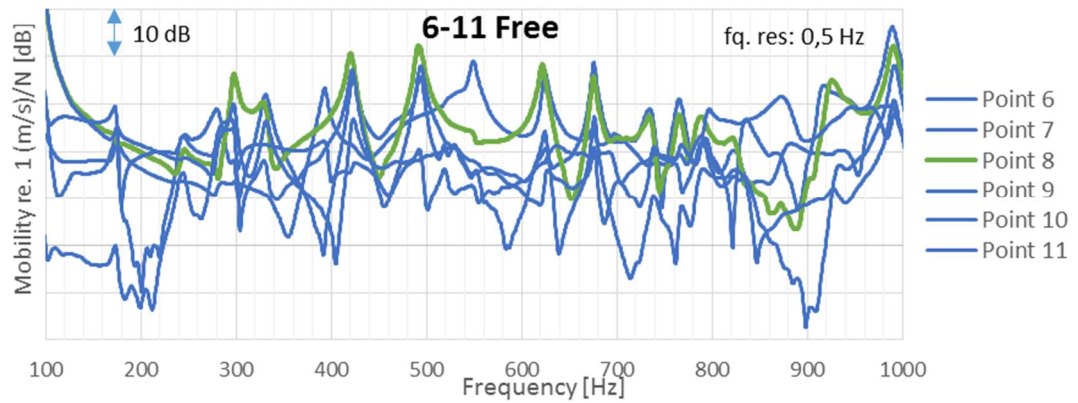
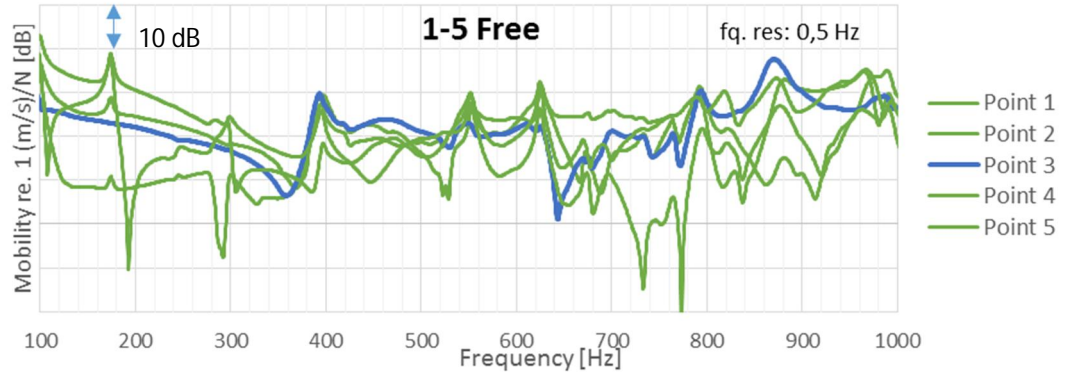
Sylinterikannen mobiliteetti

Moottorin W6L32 CR Sylinterikannelle tehtiin iskuvasaratesti sen mobiliteetin selvittämiseksi. Suoja oli vapaana (vaahtomuovin päällä) ja asennettuna moottoriin pulteilla. Mittauspisteet 1-11 ja lyöntipiste ”x” on merkitty kuvaan L2.1.



Kuva L2.1. Moottorin W9L32 E sylinterikannen iskuvasaratesti.

Testin tulokset on esitetty kuvissa L2.2-2.5, missä mobiliteetti on esitetty taajuuden funktiona taajuusvälillä 100 Hz - 1000 Hz. Kuvissa tulokset on ilmoitettu alueittain: mittauspisteet 1-5 esittävät sylinterikannen yläosan ja pisteet 6-11 muiden alueiden mobiliteetin.



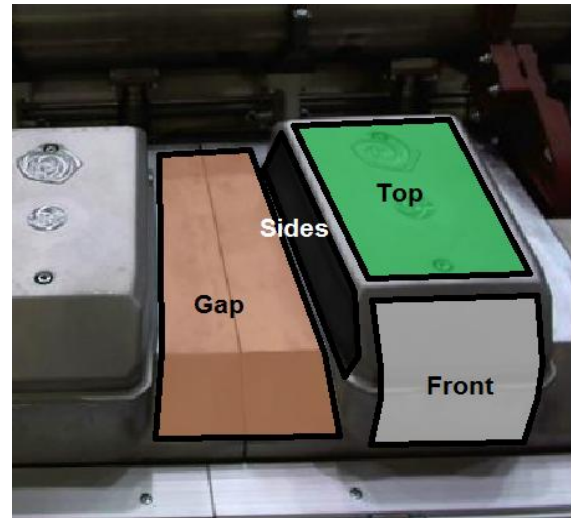
Kuvat L2.2-L2.5. *Sylinterikannen mobiliteetti, kun se on vapaana sekä asennettuna moottoriin.*

Kun sylinterikansi on vapaa, mobiliteetti saa selviä piikkejä taajuuskaistalla 100 Hz - 1000 Hz. Piikki tarkoittaa jonkin osan ominaistajuutta kyseisellä taajuuden arvolla. Mittauspisteet 6-11 saavat enemmän ominaistajuuden arvoja, koska alapuolen suoja on monimutkaisempi. Koska taas mittauspisteet 1-5 sijaitsevat kaikki saman levymäisen osan pinnalla, mobiliteetin arvoissa on vain muutama piikki.

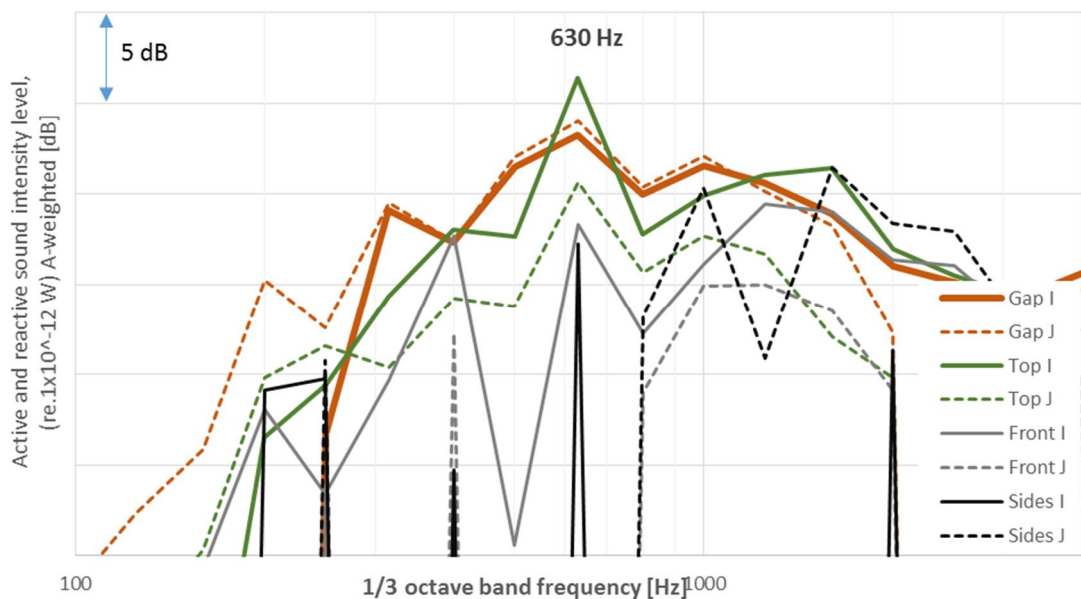
Sylinterikannen mobiliteetti muuttuu, kun se asennetaan moottorin päälle. Rakenne tulee jäykemmäksi, koska se pultataan moottoriin kiinni. Tämän vuoksi mobiliteetin arvot pääosin pienenevät. Erityisesti pienille taajuuksille (alle 400 Hz) muutos on selkeä. Mittauspisteiden 3 ja 8 arvot on korostettu kuviin, koska ne saavat suuria mobiliteetin arvoja.

Sylinterikannen tuottama aktiivinen ja reaktiivinen intensiteetti

Mittaukset tehtiin moottorin W16V34 DF 4. sylinterikannelle. Moottorin kuorma oli tällöin 100 % ja sen polttoaineena oli kaasu. Sylinterikansi jaettiin neljään eri alueeseen kuvan L3.1 mukaisesti, joille S&P-mittaukset suoritettiin äänen paikantamismittatyylillä. Kuvassa L3.2 on esitetty aktiivisen ja reaktiivisen äänen intensiteettitasojen arvot terssikaistoittain.



Kuva L3.1. Sylinterikannen mitta-alueet.

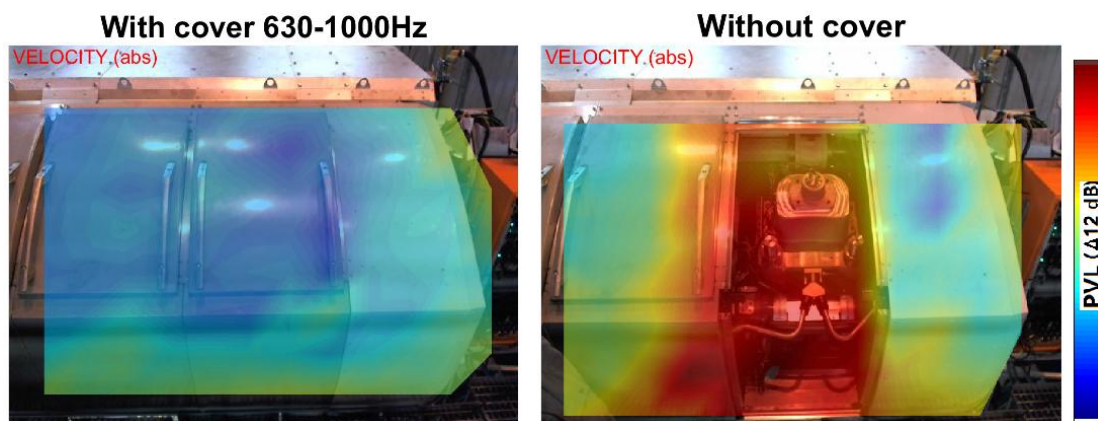


Kuva L3.2. Sylinterikannen eri alueiden tuottama aktiivinen (I) ja reaktiivinen (J) äänen intensiteettitaso.

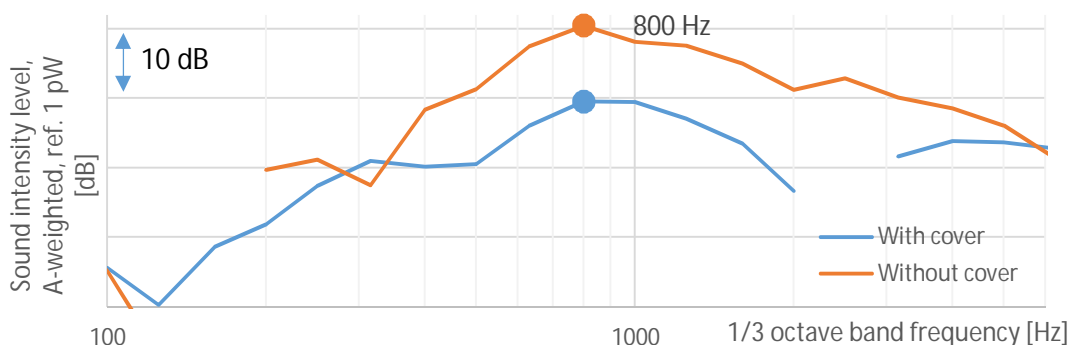
Sylinterikannen yläosa (top) ja kansien välinen alue (gap) saavat suurimmat intensiteettitasojen arvot melkein kaikilla taajuuskaistoilla. Poikkeuksia ovat arvot 200 Hz ja 2000 Hz, joissa sylinterikannen sivut (sides) sekä etuosa (front) saavat suuria arvoja. Suurimmat arvot kuvaaja saa taajuuskaistalla 630 Hz, jolloin yläosa ja välinen alue dominoivat sekä aktiivisen että reaktiivisen intensiteettien arvoja.

Ylimääräisen suojan vaikutus (W31 moottori)

Mittaukset suoritettiin moottorin W8L31 ensimmäisten sylinterikansien alueelle (vauhtipyörän puolelta katsottuna). Kuvassa L4.1 on esitetty hiukkasnopeustason värikartta, kun ensimmäinen suoja oli paikallaan (oik.) ja kun suojaa ei ollut (vas.). Tulokset ovat esitetty taajuusvälillä 630 Hz - 1000 Hz.



Kuva L4.1. Hiukkasnopeustason värikartta moottorin W8L31 ensimmäisten sylinterikansien alueelle.



Kuva L4.2 Intensiteettitaso arvoit terssikaistoittain, kun suoja joko on (sin.) tai ei ole (orans.) asennettuna moottorin päälle.

Moottorin W31 suojan lisäämisellä on merkittävä vaikutus tuotettuun meluun. Kuvaajat saavat huippunsa taajuuskaistalla 800 Hz, jolla niiden välinen ero on 10 dB (äänen intensiteettitaso). Suojalla on laajakaistainen vaikutus, kun taajuusvälillä 400 Hz – 3000 Hz tasojen välinen ero on vähintään 8 dB. Pienillä taajuuksilla vaikutus pienenee ja joillakin taajuuskaistoilla (320 Hz) suojan lisäys jopa lisää tuotettua melua. Voidaan ajatella, että tämä taajuus on jonkun rakenteen resonanssitaajuus. Ilmiö ei kuitenkaan tämän moottorin tapauksessa aiheuta suurta melutasoa. Tiivistettynä voidaan sanoa, että ylimääräinen suoja vähentää selvästi moottorin tuottamaa ääntä, kun se vaikuttaa laajalaisesti moottorimelun vahvimmalle taajuuksialueelle.